

過る速緩

— 基本整理と課題対応 —

(2016 年版)

(一社) 名古屋環未来研究所

緩速ろ過

—基本整理と課題対応—

(2016年版)



(一社) 名古屋環未来研究所

数々の疑問

— 次世代の環境と持続可能性 —

(第10号)

(一社) 名古屋環未来研究所 伊佐治知明

E-mail ize00424@nify.com

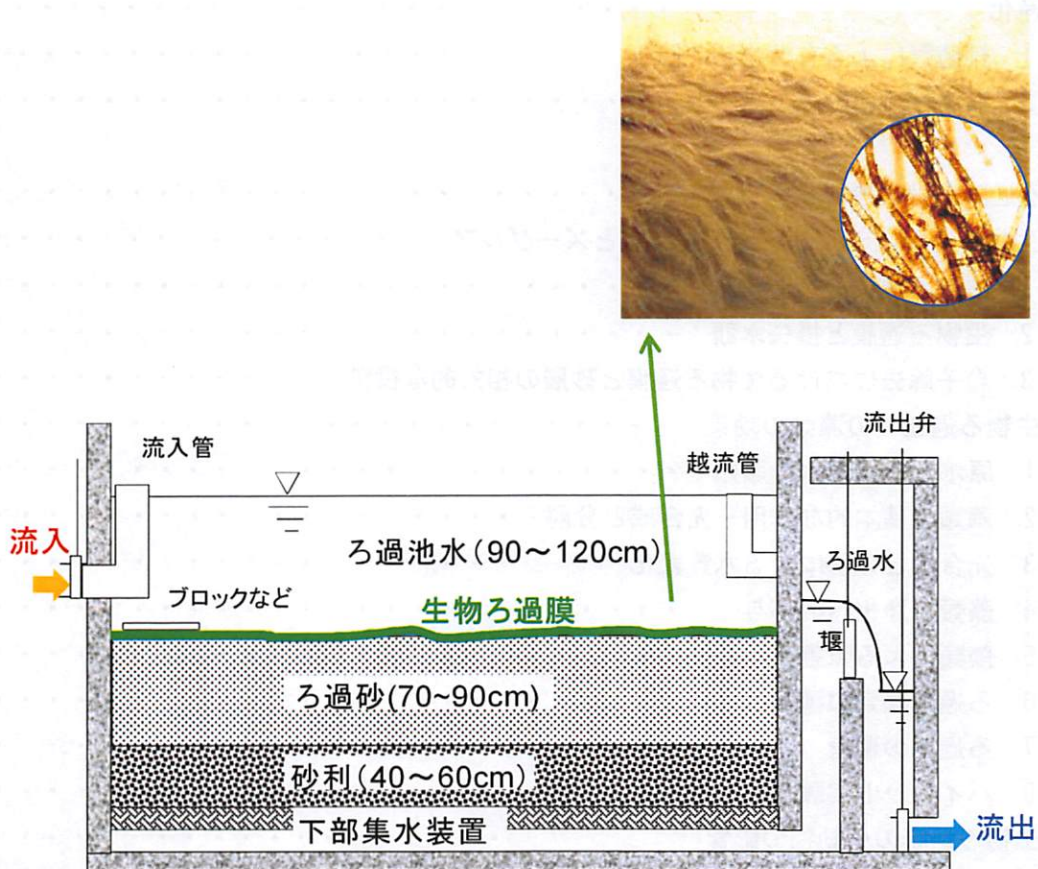
URL http://wa-links.net/home/?page_id=36

(2016年10月)

はじめに

緩速ろ過は、砂の層に水をゆっくり通すことにより、砂の表面に自然に作られる生物ろ過膜の浄化機能を活かして水道水を作る浄水処理方法です。1829年 James Simpson によりロンドンのチェルシー水道会社で設置されて以来、濁りを取り除くだけでなく、水系感染症のリスクを下げる効果も認められて、ヨーロッパ、アメリカ、アジアへと世界各地に広がっていきました。日本においても、創設期の水道は全て緩速ろ過法でしたが、広い敷地面積及び良質な原水が必要なことから、次第に急速ろ過法が主体となってきました。

現在の日本では、緩速ろ過法の浄水量に占める割合は4%程度ですが、中小を中心に2400もの施設が今なお稼働しています。ところが、緩速ろ過の維持管理上の課題の解決や施設更新の際に参考にできる情報が必ずしも十分でない現状があります。このため、名古屋環未来研究所では、緩速ろ過に関する情報整理を目的とした調査研究事業に取り組んでいます。



目次

緩速ろ過の基本整理

I 緩速ろ過の処理のメカニズム	1
1 ろ過のメカニズム	1
1.1 はじめに	1
1.2 輸送	1
1.2.1 篩分け	1
1.2.2 沈殿	2
1.2.3 遮り	3
1.2.4 拡散	3
1.3 付着	4
1.3.1 静電引力	4
1.3.2 ファンデルワールスカ	5
1.3.3 粘着力	5
1.3.4 脱着	5
1.3.5 粒子除去メカニズムと Iwasaki の式	6
1.3.6 砂層内濁度分布の計算例	6
1.4 浄化	8
1.4.1 細菌類による有機物質の除去	9
1.4.2 病原性細菌の除去	12
2 生物ろ過膜と浄化機能	13
2.1 生物ろ過膜（シュムッツデッケ）とズーグレア	13
2.1.1 生物ろ過膜の機能	13
2.1.2 生物ろ過膜と損失水頭	14
2.1.3 粒子除去における生物ろ過膜と砂層の相対的な役割	14
2.2 生物ろ過膜での藻類の効果	15
2.2.1 原水とろ過池水の藻類	15
2.2.2 藻類の基本的な作用—光合成と分解	15
2.2.3 光合成と分解による水質変化	16
2.2.4 藻類の浄化への寄与	17
2.2.5 藻類による障害	17
2.2.6 ろ過膜藻類の種類	19
2.2.7 ろ過池の覆蓋	21
2.2.8 パイロット実験の必要性	21
2.3 生物ろ過膜の小動物の影響	21
2.3.1 小動物の働き	22
2.3.2 小動物による障害	22

2.4	緩速ろ過による水質変化	22
2.4.1	粒子の除去	23
2.4.2	細菌類及び藻類の除去	24
2.4.3	溶存無機成分の変化	24
2.4.4	溶存有機成分の変化	29
3	ろ過の水理	32
3.1	Darcyの法則	32
3.1.1	損失水頭	32
3.1.2	損失水頭とろ過池の運転	32
3.1.3	透水係数	34
3.1.4	温度の効果	35
3.1.5	初期損失水頭の計算例	36
3.2	損失水頭と負圧の影響	37
3.3	壁面短絡流の影響	38
4	ろ過池の運転条件とろ過水水質	40
4.1	原水水質と気象条件	41
4.2	ろ過砂の粒径とろ過速度	42
4.3	前処理および塩素処理の効果	43
5	緩速ろ過の短所と長所	46
5.1	緩速ろ過の短所	46
5.2	緩速ろ過の長所	47
II	緩速ろ過の設計	49
	(1)ろ過面積及び池数	
	(2)ろ過池の形状と構造	
	(3)ろ過砂及び砂ろ過層	
	(4)下部集水装置と砂利層	
	(5)調節装置	
	(6)ろ過池の覆蓋	
	(7)洗砂設備	
III	緩速ろ過の維持管理	60
	(1)ろ過池の立ち上げ(運転開始)	
	(2)ろ過池の運転	
	(3)ろ過池の清掃	
	(4)補砂	
	参考資料	65

緩速ろ過の課題対応

I 現状の課題対応	67
1. 継続的な課題への対応	67
1.1 緩速ろ過の濁度管理	67
1.2 緩速ろ過の残塩管理	73
1.3 緩速ろ過の生物の働きと障害	77
1.4 緩速ろ過のろ過閉塞	82
1.5 その他の問題	84
2. 維持管理の効率化・簡易化	88
2.1 緩速ろ過の運転監視	89
2.2 緩速ろ過の効率的又は簡易な運転	93
2.3 緩速ろ過池の無人運転	97
3. 前処理の事例	98
II 新たな課題対応	102
1. 新たな水質リスクへの対応	102
1.1 微量有機化学物質および無機化学物質	105
1.2 消毒副生成物、病原微生物、放射性物質等	112
2. 緩速ろ過の特徴	119

浄水場訪問記

1. 名古屋市鍋屋上野浄水場	121
2. いなべ市藤原浄水場	123
3. 韓国大邱市	125

事例研究

1. オゾン処理を前処理とした緩速ろ過	131
2. 緩速ろ過における藻類の影響	146
3. 緩速ろ過の生態水文学に基づく管理	176

1. ろ過のメカニズム

1.1 はじめに

ろ過は、「輸送」「付着」「浄化」の3つのメカニズムに分けることができる。

緩速ろ過では、原水に砂のろ過層を通過させる過程で、懸濁態の不純物は砂粒子表面に接触しそこで保持される。それらのうち化学的、生物学的反応を受けない物質は、ろ過池の洗浄により除去されるまで、その場に保持される。一方、化学的、生物学的分解を受ける物質はより単純な物質へと変換され、水中に溶け込んでいくか、他の非反応性物質と共に砂層に残って、水中から除去される。

種々の力がこれらの段階で作用しているが、便宜上、輸送(transport)、付着(attachment)、浄化(purification)メカニズムに分けることができる。この節では、これらの作用について別々に分けて記載するが、実際の稼働条件下ではこれらを明確に分けることは難しい。また、これらのプロセスの相互作用を十分に理解するためには、なおまだ多くの研究が必要という状況である。

1.2 輸送

懸濁粒子が輸送され、ろ過砂粒子に接触するまで運ばれる輸送プロセスには、主要なものとして篩分け(screening)、沈殿(sedimentation)、遮り(straining)、拡散(diffusion)がある。

1.2.1 篩分け(Screening)

篩分け:ろ過砂粒子の間隙を通過できない大きさの粒子の阻止。その効果は、ろ過速度に依存しない。

篩分けは、ろ過砂粒子の間隙を通過できない大きさの粒子を阻止し(interception)捕捉する最も明確なプロセスである。これは、ろ過層の表面で起こり、ろ過速度に依存しない。

図 1.1 に示すように、均一な大きさの球形の砂粒子が緊密に充填されているろ過層の空隙は、砂粒子の直径の 7 分の 1 の粒子の通過を防ぐほど小さなものである。このため、例えば、 $150\mu\text{m}$ の粒子径 (緩速ろ過砂の最小の有効径、有効径については後述) の場合、最小の空隙の大きさは約 $20\mu\text{m}$ で、コロイド粒子 (直径 $1\mu\text{m}$ 以下) や細菌類 (長さ $15\mu\text{m}$ まで) は阻止で

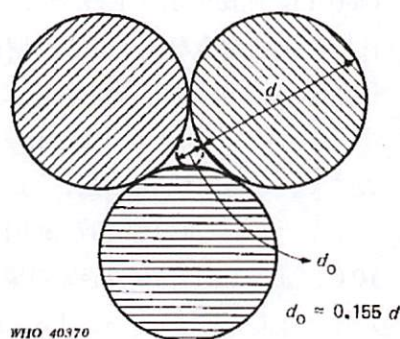


図 1.1 粒子径と空隙の大きさの関係 (参考資料1より)

きないことになる。

ろ過層を通過する際、水の流れによる粒子の捻り(*twisting movement*)が起こり、水中の粒子が相互に接触してある種の凝集(*aggregation*)が起こる。凝集により、節分け効果で捕捉されるのに十分な大きさの粒子になることがある。

ろ過の継続とともに、生物ろ過膜 (あるいはシュムッツデッケ *schmutzdecke*: 後述)が成熟 (*ripening*) していき、砂粒子に沈殿物(*deposits*)が増加し空隙の大きさが小さくなることで、ろ過層の節分け効果を大きくする。一方で水が通り難くなり、最終的には、ろ過池の清掃 (*cleaning*) が必要となる。

1.2.2 沈殿 (Sedimentation)

沈殿: 大きい粒子で重要な役割。沈殿効率、ろ過速度と粒子沈降速度の比に関係する。

砂層内の空隙内で起こる沈降作用 (*settling action*) は、懸濁粒子が砂粒子の表面に沈殿する。これは、通常の沈殿槽で起こることと似ているが、沈殿槽の場合は沈殿槽底面に沈殿物が蓄積するが、ろ過池の場合、理論的には上流側に向いた砂粒子の表面で沈殿が起こり、その表面積の総合計が沈殿面積となる。

空隙率が p 、直径 d の 1m^3 のろ過砂の総表面積は、 $(6/d)(1-p)\text{m}^2$ となり、空隙率 38%、平均粒子径 0.25mm の砂 1m^3 の総表面積は $15,000\text{m}^2$ である。もし、上流方向に向いていない面、他の粒子と接触している面、常に水による洗浄を受ける面など全てを考慮に入れても、ろ過層の 1m^2 当たりの沈殿表面積は優に $1,000\text{m}^2$ に達する。

砂粒子の表面積の合計を、ひとつに繋がった沈殿面積として考えると、表面負荷 (*surface loading*: 処理水量を沈殿面積で割ったもの) は、大変小さなものになる。処理水量 $0.2\text{m}^3/\text{hr}$ で、 $0.2 \times 10^{-3}\text{m}/\text{hr}$ となる。

沈殿効率(*sedimentation efficiency*)は、ろ過速度 (*filtration rate*) と粒子の沈降速度 (*settling rate*)の比の関数となる。粒子の沈降速度が、ろ過速度と等しいか又は大きい時、沈降による完全な粒子除去が期待される。

Stokes によれば、層流沈降による粒子沈降速度 v は、次式で示される。

$$v = 1/18 \cdot g/\mu \cdot \Delta\rho/\rho \cdot d_p^2 \quad (1.1)$$

ここで、 d_p = 粒子直径、 ρ = 水の密度、 $\rho + \Delta\rho$ = 粒子の密度

g = 重力加速度 ($9.81\text{m}/\text{s}^2$)、 μ = 流体の動粘性係数(*kinetic viscosity*) である。

10°C 、 $\mu = 1.31 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ の場合、式は

$$v = 1.5 \times 10^{-3} \times \Delta\rho/\rho \cdot d_p^2 \text{ m/hr} \quad \text{となる。}$$

有機の懸濁粒子の密度は、水より僅かに大きいのみであり、 $\Delta\rho/\rho$ は通常 0.01 より小さい。このため、有機物粒子の沈殿による完全除去が起こるケースは、次のようである。

$$1.5 \times 10^{-3} \times 0.01 \times d_p^2 \geq 0.2 \times 10^{-3}$$

すなわち $d_p \geq 4 \mu\text{m}$ で、 $4 \mu\text{m}$ より大きい粒子が沈殿により除去されることになる。

より小さく軽い粒子は一部除去され、ろ過層内深く水が通過するにつれて、フロック形成 (flocculation) により僅かに沈殿効率が上昇する。コロイドは粒子径 $1 \mu\text{m}$ 以下であり、沈殿では除去されないと考えられる。

1.2.3 遮り (Interception)

遮り: 粒子が水の流線から離れて、砂まで輸送される。大きい粒子ほど起こり易い。

遮りは、図 1.2 のように、粒子が流線と共に砂粒子の最近接まで運ばれると、慣性力と遠心力 (inertial and centrifugal forces)、ファンデルワールス力 (Van der Waals force) により、かすり効果 (brushing effect) により砂まで輸送される。粒子が大きいほどかすりも大きくなる。

慣性力及び遠心力は、周囲の水より比重の大きい粒子に作用し、粒子を流れから離脱させ砂粒子に接触させる。

ファンデルワールス力は普遍的に作用する力で、輸送と付着の両方のメカニズムに寄与している。個々の砂粒子に付着している膜の平均的な厚さは、例えば $25 \mu\text{m}$ の範囲とすると、これは、コロイドや分子状の不純物を砂粒子表面に引き付けるのに重要な役割をする重力が作用しないほどの厚さとなる。ファンデルワールス力は分子間の距離でも弱く、距離の 6 乗に比例して小さくなるからである。このためファンデルワールス力の役割は大きくないが、慣性力および遠心力に補足的に作用し、粒子を砂粒子に近接させる効果がある。

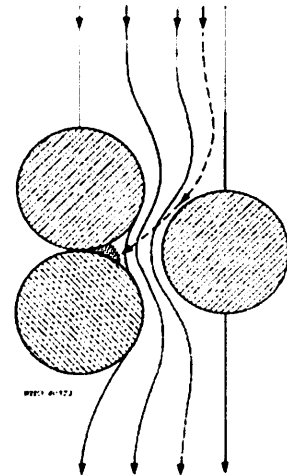


図 1.2 遮り (参考資料1より)

1.2.4 拡散 (Diffusion)

拡散: ランダムな動きにより、粒子が水の流線から離れて、砂まで輸送される。小さい粒子で重要な役割となる。

気体や液体の熱エネルギーは、分子のランダムな運動 (ブラウン運動 Brownian movement) の形で現れる。これらの分子が粒子と衝突する時、粒子も同様にランダムに動く。粒子の動きは、ランダムウオーク (random walk) といわれる、一連の不連続なステップとなる。もし、粒子が移流で運ばれていると、拡散がそれに重ねられ、粒子はある流線から他の流線へと移動する。その結果、粒子は砂粒と衝突する (図 1.3)。推定として、移流速度が遅いほど、粒子の単位時間当たりのステップが増えてくる。この

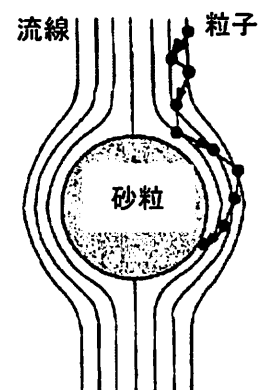


図 1.3 拡散 (参考資料1より)

ため、衝突の確率は、水の間隙通過速度が減少するにつれ増加する。また、温度が上昇すると、熱エネルギーが大きくなり、単位時間当たりのステップ数が増え、衝突の確率も増える。拡散は、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子で最も重要となる。

図 1.3 で示した流線は、単一の粒子に関する理想化したものである。多くの砂が充填されたる過層では、流線は、図 1.4 に示したように、より曲がりくねったものになる。どの 2 つの流線の流れは等しく、その内部の空間は流管 (streamtube) といわれる。曲りくねった流線の形状では、流管はランダムに枝分かれが起こる。

この連続的な枝分かれにより、粒子と砂粒の衝突の機会が生まれる。図 1.4 に示すように、間隙内のどの粒子も、その流れの経路のある点で砂粒と衝突する。ある、移動距離内で衝突が起こる確率は、砂粒の粒径、流速及び水温に依存する。間隙通過速度が遅いと、単位距離当たりの拡散によるランダム運動のステップがより多くなるので衝突確率が高くなる。間隙通過速度が増加すると衝突確率は低くなるが、ある点で、それ以上の速度では差がない状態になる。また、温度が高いほどランダム運動のステップが大きくなり、衝突の確率も増える。

1.3 付着

懸濁粒子を砂粒子表面に接触した場所で保持する主要な力は、静電引力 (electrostatic attractive force)、ファンデルワールス力、粘着力 (adherence) である。付着については、しばしば吸着 (adsorption) という語も使用されている。

1.3.1 静電引力 (Electrostatic attractive force)

静電引力: 新砂は負の表面電荷を持ち、金属の陽イオンや正の電荷を持つコロイド粒子を付着させる。有機性コロイドは、負の電荷を持つため砂表面が正の粒子で過飽和になると付着されやすくなる。

静電引力は、異なる電荷間に作用するで、距離の 2 乗に逆比例する。ファンデルワールス力と同様に、砂粒子の近傍に反対の電荷を持つ粒子が運ばれてきたとき、他の輸送メカニズムに補足的に作用する。もちろん、同じ電荷を持つ砂粒子は粒子を跳ね返すので、反対の電荷を持つ砂粒子に近接するまで流れ続ける。

通常の石英砂は、その結晶構造から負の電荷を持ち、鉄、マンガン、アルミニウムなどの金属の陽イオンや正の電荷を持つコロイド物質の粒子 (炭酸塩の結晶、鉄やアルミニウムの水酸化物のフロック) を引き付けることができる。有機性のコロイド粒子は、細菌類も含めて、通常は負の電荷を有しているため反発される。このことが、新砂の使い始めの

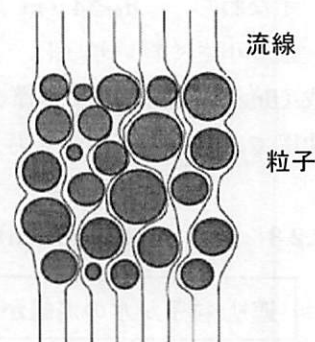


図 1.4 砂層内の流線
(参考資料2より)

ろ過池では、このような不純物が除去できない理由のひとつである。ただし、ろ過膜の成熟プロセスで、正に帯電した粒子がろ過砂表面に蓄積していき、正の電荷が過飽和になると砂とそこに付着した粒子を正の電荷の状態にする。このようにして、負に帯電した不純物、例えば動物及び植物起源のコロイド物質、硝酸やリン酸などの陰イオンも、吸着(adsorption)させることができる。この作用は、再度電荷が逆の過飽和になるまで続く。この電荷の反転は、ろ過池の運転継続を通して継続的に起こる。また、この現象に関係する別の因子として、砂の結晶格子に弱く吸着したイオンを水が流し出す場合もある。

岩石を破砕して作られる新砂は負の電荷を有しているが、川砂は、その間を流れる水から正の電荷成分を付着させることがあり、この場合には最適のろ過条件に至るための成熟(ripening)期間が短くなる。

【維持管理】 新砂は有機性コロイドを付着させにくい。このため、補砂する場合は、旧砂を新砂の上の置く切り返しを行うことで、ろ過膜成熟期間を短くすることができる。

【維持管理】 川砂は、山砂に比べて正の電荷成分を付着させていることがあり、ろ過膜成熟期間が短くなる。

1.3.2 ファンデルワールス力 (Van der Waals force)

この力は、水中から粒子を引き出すほどの力ではないが、一旦砂粒子表面に付着した粒子の保持という点では、両者の距離が非常に短いため、かなりの効果を発揮する。

1.3.3 粘着力 (Adherence)

粘着力: 生物ろ過膜や砂粒子の表面に形成されるズーグレアは、細菌類やその排泄物等から成っており、粘着性のゼラチン状の膜で、粒子を付着させる効果がある。

ろ過膜成熟期間に、有機性の粒子はろ過膜表面あるいはろ過層上部の砂粒子上に捕捉(arrested)あるいは沈積(deposited)する。この沈積物は、直ちに細菌類や他の微生物の捕食(breeding)を受ける。これらは、ズーグレア(zooecia: 粘性被膜)といわれる薄い物質で、活性のある細菌類やそれらの排泄物、死細胞、一部の同化(assimilated)有機物から成っている。ズーグレアは、生物ろ過膜や砂粒子の表面に形成される粘着性のゼラチン状(sticky gelatinous)の膜で、原水に含まれ前述の輸送メカニズムにより運ばれてきた粒子を付着させる。また、有機性の物質からなる粒子は、やがて同化されズーグレアを形成する。非反応性の物質は、砂層の洗浄により除去されるまで、ズーグレアに保持される。

1.3.4 脱着 (Desorption)

脱着: 粒子と砂の付着力が弱いと、粒子が脱離して再び水中に混入することがある。

砂粒子上に蓄積した粒子の一部が脱離して、再び水中に混入することがある。緩速ろ過のように凝集処理をうけていない粒子は、粒子と砂の付着力が弱く、脱着が起こることがある。

1.3.5 粒子除去メカニズムと Iwasaki の式

粒状のろ過材が充填された急速ろ過池での粒子除去に関する数学的なモデルは、Iwasaki (1937) により得られている。緩速ろ過では、生物ろ過膜による粒子除去に関する係数の設定は容易ではないが、応用できないことはない。

$$dC/dz = -\lambda C$$

ここで、 $C =$ 粒子濃度 (個/mL)

$z =$ 濃度 C を測定するろ過層の先端からの距離 (m)

$\lambda =$ ろ過係数 (cm^{-1})

この式を積分すると、粒子濃度は距離と共に指数関数的に減少する形になる。係数 λ は、ろ過プロセスの効率を示す。 λ が大きくなればなるほど、濃度分布はより急になる。 λ は、遮り、沈殿、拡散の輸送メカニズムを考慮して、計算される。

1.3.6 砂層内の粒子濃度分布の計算例

[式] 篩分けにより、砂粒子直径の 1/7 の粒子を阻止

例: 有効径 0.15mm のろ過砂の阻止粒子径 21 μm

[式] Yao and O' Melina による

粒子捕捉効率 $\eta =$ 沈殿 + 拡散 + 遮り

$$= v/U + (2kT/3\pi\mu d_p)^{2/3}(4/DU)^{2/3} + 3/2(d_p/D)^2$$

(v : 沈降流速、 U : ろ過速度、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度、

μ : 水の粘性係数、 d_p : 濁質粒子径、 D : 砂粒子径)

ろ過係数 λ

$$\lambda = 3(1 - \varepsilon)/(2D) \cdot \eta$$

(ε : 砂層空隙率)

Iwasaki の式より、原水濃度を C_{in} 、ろ過水濃度を C_{out} とすると、

$$C_{out} = C_{in} \cdot \exp(-\lambda \cdot z)$$

(z : 砂層厚さ)

さらに、脱着による濃度増加 (Mintz による) を考慮すると、

$$C_{out} = C_{in} \cdot \exp(-\lambda \cdot z) + a \cdot \sigma \cdot z / U$$

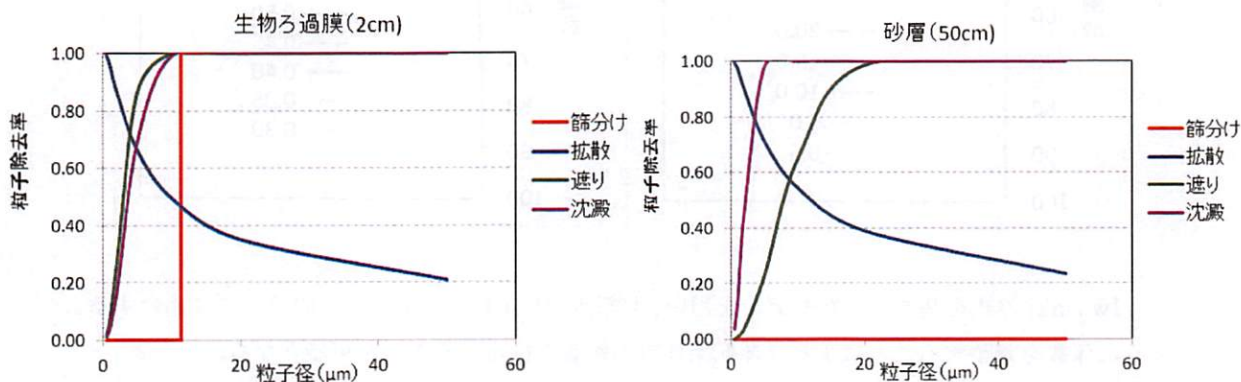
(a : 砂-粒子の結合力を表す指数、 σ : 砂層体積あたりの蓄積濁質粒子量、 U : ろ過速度) (参考資料 6 より)

-共通計算条件-

原水濁度 10度 濁質密度 1.01g/cm³ 水温 20°C ろ過速度 4m/day
 ろ過砂有効径 0.4mm 砂層空隙率 0.4 a(砂-粒子の結合力指数) 10⁻⁹
 生物ろ過膜 有効径 0.08mm 同空隙率 0.1 同厚さ 2cm a(砂-粒子の結合力指数) 0
 砂層内洗浄濁度 0~2cm 2000度 2~15cm 300度 15~30cm 100度 30~100cm 30度

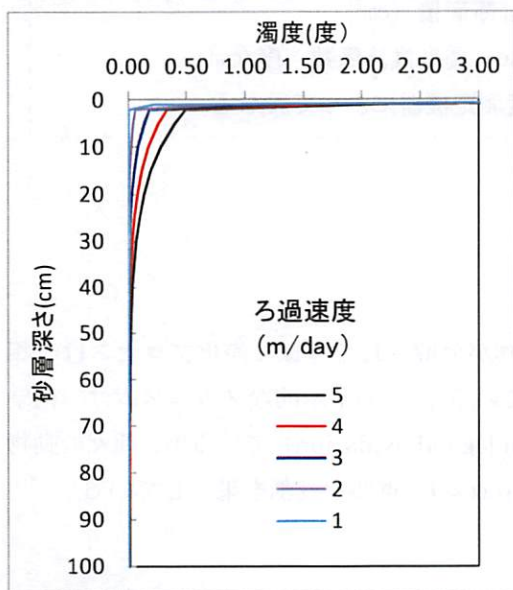
-生物ろ過膜と砂層 50cm までにおける、輸送メカニズムによる濁質粒子径ごとの除去率-

篩分けは、有効径により決まる。拡散は粒子径が小さいほど、遮りと沈殿は粒子径が大きいほど除去率が高くなる。

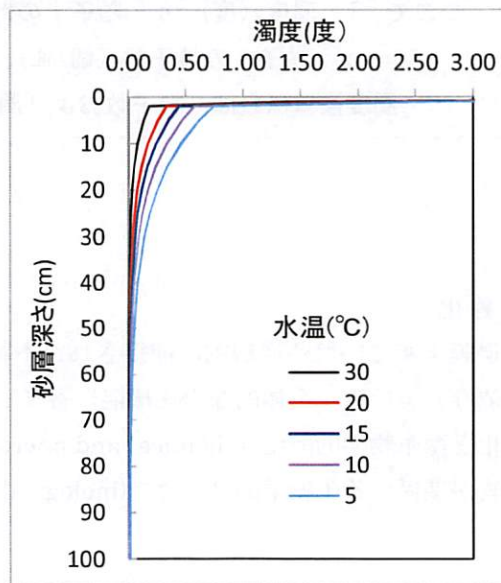


-砂層内の濁度分布-

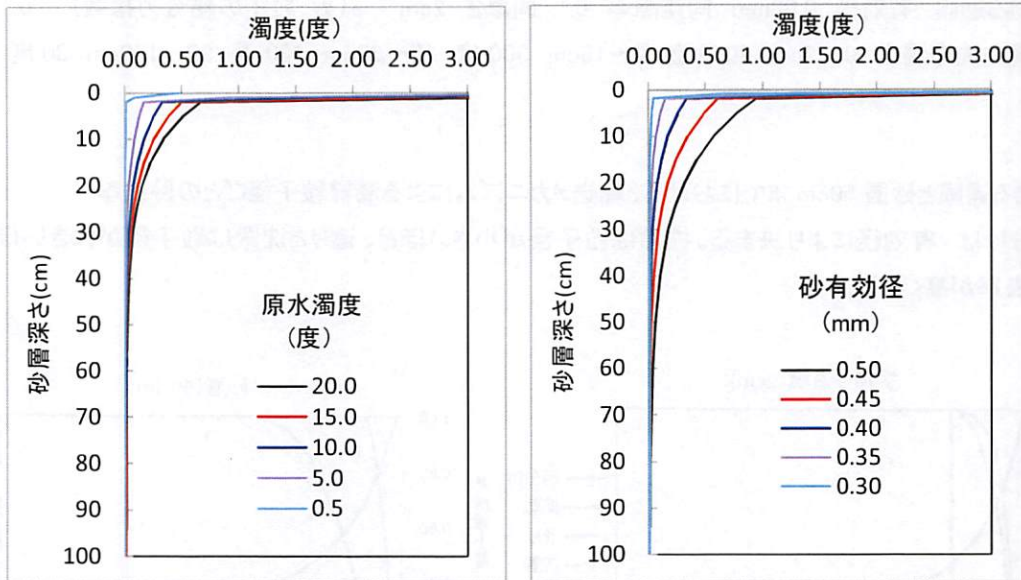
[ろ過速度による砂層内濁質の侵入への影響]



[水温による砂層内濁質の侵入への影響]



[原水濁度による砂層内濁質の侵入への影響] [砂の粒度による砂層内濁質の侵入への影響]



Iwasaki の式を基本としたモデルを用い、実際池やパイロットプラントのデータに適合するように係数を調整することにより、運転条件等の影響を推定することが可能となる。

[参考] 濁度と粒子数の関係

$$T = Kc \cdot \sum (c_i \cdot n_i)$$

ここで、 T : 濁度 (度)、 c_i : 粒子 i の散乱断面積 (cm^2)

c_i : 粒子 i の粒子数 (個/mL)、 Kc : 濁度換算係数 (度/ cm^2)

濁度換算係数は、粒子数および濁度測定機器によって異なる。

1.4 浄化

ろ過膜上あるいはろ過層内に捕捉された不純物が分解される多様な浄化プロセスは、相互に依存している。全体的な浄化機能に寄与している 2 つの基本的なメカニズムは、化学的酸化と微生物学的酸化 (chemical and microbiological oxidation) であるが、種々の動物や植物が関係する生物学的プロセス (biological process) も重要な役割を果たしている。

1.4.1 細菌類による有機物質の除去

緩速ろ過池では、種々の細菌類が生息し、有機物質を分解無機化する。この細菌類の活性は、深さと共に減少するが、より深い層では硝化も起こる。有機物を分解する細菌や硝化菌などはろ過層内で層別に分布しているため、ろ過速度の急変や水質変動で平衡が崩れる。有機物質の酸化を進めるためには、反応時間、溶存酸素が必要で、水温が低下すると効率が低下する。

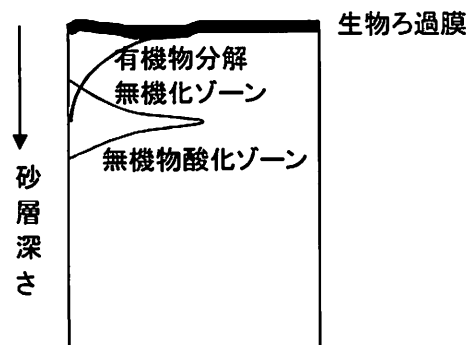
生物ろ過膜とズーグレア内では、原水に含まれていた細菌類が増殖し、沈積した有機物を餌として利用する。細菌類は、餌の一部を酸化し、代謝に必要なエネルギーを作り出し（異化 *dissimilation*）、増殖のための細胞構成物質に変換する（同化 *assimilation*）。このため、死んだ有機物質も生きている物質に変えられることになる。異化生成物は、水により流れ去り、より深い層で再び他の生物に利用される。細菌類の生息数は、流入水からもたらされる有機物質の量に制限される。

また、細菌の死滅に伴い放出された有機物質は、より浅い層で細菌類に利用され、さらにまた、細菌の死滅により有機物質が放出されることになる。このようにして、原水中の生分解性(*degradable*)有機物の全ては、徐々に分解され、二酸化炭素や無害の無機化合物、硫酸塩、硝酸塩、リン酸塩に変換されて（無機化 *mineralization*）、ろ過水中に含まれる。

このような細菌類の活性は、ろ過層の上部で優先しており、餌が少なくなるため深さと共に徐々に減少していく。ろ過池がろ過膜表面の削り取り(*scraping*)により洗浄されると、その層の細菌類は除去されるので、必要な生息数に至るため成熟期間が必要となる。ろ過速度にもよるが、30～40cmの砂層深さでは、細菌類の活性は小さいが、生物化学的(*biochemical*)な反応により、アミノ酸のような微生物学的分解生成物が、アンモニア、亜硝酸、硝酸に変化するし、さらにアンモニア、亜硝酸が硝酸に酸化される（硝化 *nitrification*）ことも起こっている。

種々の種類の細菌類が、ろ過層表面下の種々の深さで生息するのが通常であり、真の水中細菌(*true water bacteria*)はより深い層で優占している。Schmidtによれば、ろ過層を特定の細菌が優占するゾーンに細分すると、図 1.5 のように、それぞれの効果を示すゾーンを定義できるとしている。ろ過速度を急に变化させるとこの平衡が崩れ、ろ過水質の悪化につながる。緩速ろ過は、可能な限り中断なく一定ろ過速度で運転するように設計されている施設であるからである。同様に、種々の細菌類の生息数は、通過する水が供給する餌の種類と量に適応しているため原水水質の変動も避けるべきである。必要に応じて、水質変動を緩和するために十分な容量を有する原水貯留池(*raw water storage reservoir*)を備えるべきである。

図 1.5 砂層内の水質浄化ゾーンの分布、各ゾーンの深さは、原水水質、ろ過砂の粒度、ろ過速度により異なる。



有機物質の生物化学的な酸化を十分に進めるために、十分な時間と十分な酸素が必要であり、加えて水温も低下しすぎないことが重要である。十分な時間は、ろ過速度を低くし、ろ過層との接触時間を維持することで確保できる。酸素の含有量は重要で、ゼロになってしまうと、ろ過の間に嫌気的な分解が起こり、硫化水素、アンモニア、その他の異臭味物質が発生し、溶存鉄やマンガンが溶出して水道水の着色障害が起こる。このため、ろ過層のどの位置でも嫌気的な状態にしないようにするためには、ろ過水の平均的な溶存酸素濃度を 3mg/L 以下にしないようにする必要がある。原水の溶存酸素濃度を上げ酸素要求量を下げするために、原水の曝気(aeration)を行うことがある。

低水温時に、緩速ろ過の効率は著しく低下する。水温は、化学反応速度や細菌類や微生物の代謝 (metabolism) 速度に影響するからである。このことは、例えば、緩速ろ過による過マンガン酸カリウム消費量の低減への温度の影響で示されている。Van de Vloed によれば、 T ($^{\circ}\text{C}$) での過マンガン酸カリウム消費量の減少 (mg/L) は、 $(T+11)/9$ となる。このため、 25°C で過マンガン酸カリウム消費量は 4 mg/L 減少するが、 7°C では 2 mg/L の減少になる。また、 6°C 以下では、アンモニアの酸化は事実上停止する。気温が 2°C 以下に下がると、熱損失を防止するためにろ過池に覆いをかけるか、ろ過池での浄化機能が不十分の場合の予防措置としてろ過水の塩素消毒を行う必要がある。

[維持管理] ろ過速度を急変させない。

ろ過水の溶存酸素濃度 3mg/L 以下にしないようにする。

予防措置としてろ過水の塩素消毒を行う。

[設計]

水質変動を緩和するため、原水貯留池を設ける。

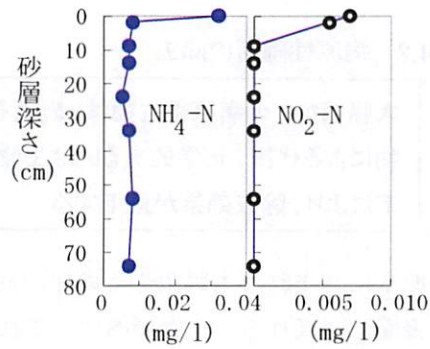
原水の酸素要求量が多い場合は、曝気(エアレーション)を行う。

ろ過池の熱損失を防止するため、ろ過池を覆蓋する。

一硝化によるアンモニア及び亜硝酸の除去一

一名古屋市の事例一

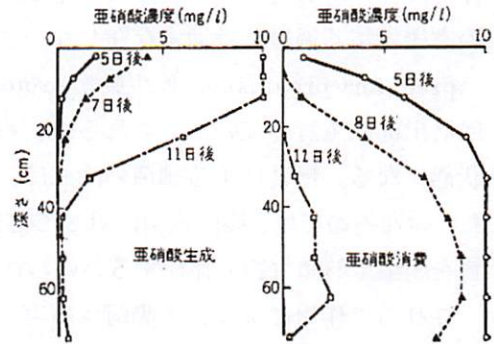
砂層内でのアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) および亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) の変化 (1991.3.5)。原水の生物分解性有機物濃度 (BOD) が低く、アンモニアの酸化は生物ろ過膜で起こり、少し遅れて亜硝酸の酸化が起こる。



一砂層の亜硝酸生成及び消費能力の分布一

一東京都の事例 (参考資料5より)一

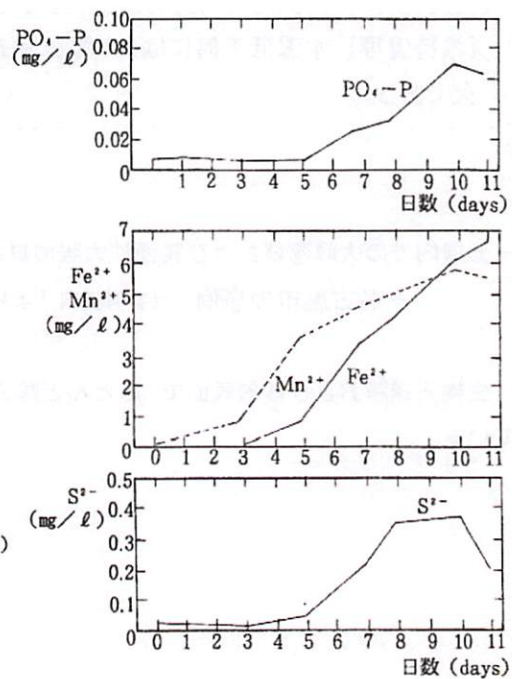
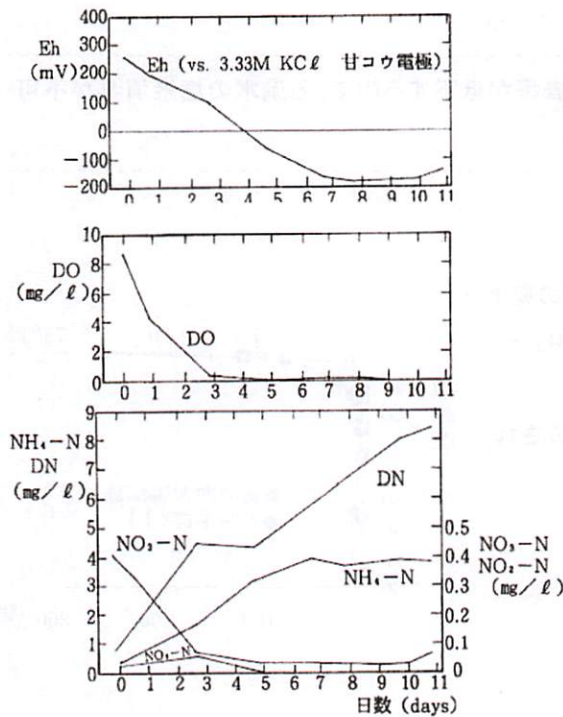
アンモニアを酸化して亜硝酸を生成する細菌は表層付近に分布し、亜硝酸をさらに酸化する細菌は表層には少なく下層に向かって多くなっている。



一生物ろ過膜の分解による水質変化一

一名古屋市の事例 (参考資料7より)一

生物ろ過膜をろ過水とともにフラン瓶に入れ 20°Cに保つと、酸化還元電位、溶存酸素の低下とともにアンモニア、リン酸、鉄、マンガン、硫化物の溶出が起こる。



1.4.2 病原性細菌の除去

大腸菌などの病原微生物は、緩速ろ過により除去される。ろ過層では増殖不可能、摂食動物による代謝、化学的あるいは生物的な毒の作用などが除去のメカニズムである。水温低下により、除去効果が低下する。

原水に含まれる大腸菌やその他の病原菌などの細菌類は、輸送メカニズムでろ過砂の粒子表面に運ばれる。ろ過層内は、これら腸内細菌(intestinal bacteria)の増殖には適した条件ではない。30℃以下の温度では増殖できないし、必要な栄養量を満たすだけの動物起源の有機物がろ過層には通常存在しないことが理由である。また、数多くの種類の摂食生物(predatory organisms: 原生動物 protozoa や線虫など下等後生動物 lower metazoa) がろ過層上部に生育している。これらは、ろ過層が深くなるにつれ適切な餌が少なくなり飢餓状態になる。摂食による細菌の除去は、特に代謝速度が増す高水温時には顕著になる。また、緩速ろ過では、腸内細菌に対して化学的あるいは生物的な毒(poison)となる種々の物質を産生する微生物も存在するといわれている

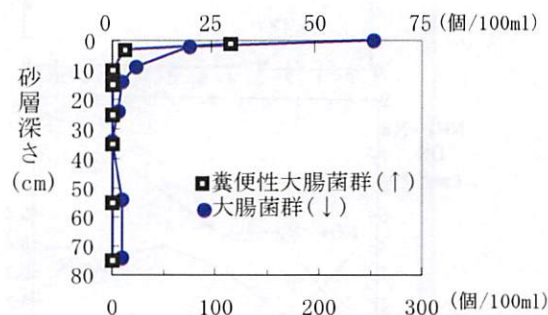
これらの作用により、大腸菌は事実として減少しており、加えて、大腸菌の減少は病原菌の減少と相関関係がある。この効果は、十分な餌、酸素、適した温度の条件下に形成される動物相(flora)および植物相(fauna)により、より大きなものになる。低水温では、細菌類を捕食する原生動物や線虫類の活性は急激に低下し、同時に腸内細菌の代謝そのものも低下するので、これらが生き残ってろ過層を通過する機会が増加する。大腸菌が減少する係数が、通常 100~1000 の範囲にあるものが 2℃以下では 2 まで低下するので、水道水の水質を維持するためには塩素消毒が不可欠となる。

[維持管理] 水温低下時には、大腸菌除去率が低下するので、ろ過水の塩素消毒が不可欠である。

一砂層内での大腸菌群および糞便性大腸菌群の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料7より) 一

生物ろ過膜および砂層表面で、ほとんど除去されている。



2. 生物ろ過膜と浄化機能

2.1 生物ろ過膜（シュムッツデッケ）とズーグレア

生物ろ過膜は、ろ過砂表面に沈積又はそこで合成される物質の薄いマットで、シュムッツデッケ (Schmutzdecke) といわれる。この言葉は、「汚れた被膜 dirty skin」と訳されるドイツ語で、当初、アメリカで使われていたが、今は広く使われている。また、シュムッツデッケは、生又は死細菌から成るゼラチン状の粘性被膜（ズーグレア zoogloea といわれる）で覆われている。ズーグレアは、シュムッツデッケに加えてろ過層表面近くの砂層にも存在する。

2.1.1 生物ろ過膜の機能

緩速ろ過池の浄化の大部分は、生物活性が高いズーグレアに覆われた生物ろ過膜で起こる。非生物的な炭酸塩沈積物のろ過膜では、砂層上部のズーグレアが機能する。

緩速ろ過池の浄化の大部分は、生物活性が最も高い生物ろ過膜で起こっている。生物ろ過膜では、細菌類に加えて、糸状藻類や他の多くの生物、例えばプランクトン、付着藻類、原生動物、ワムシなどが生息している。細菌類の活性は高く、通過する水の有機物を捕捉、消化、分解している。ろ過池の水 (supernatant water) に含まれる藻類の死細胞や原水中の生存細菌も、ともにこのろ過膜内で消費・分解され、そのプロセスの中で無機塩が作られる。同時に窒素化合物も分解され、酸化される。ある種の色度成分は除去され、不活性の懸濁物質のかなりの部分が機械的に篩分けされる。

新設のろ過池の稼動直後で生物膜が形成されていない時、大腸菌群の除去率はほぼ 0 であるが、生物膜が形成された後は、除去率は $2\text{-log}(99\%)$ から $4\text{-log}(99.99\%)$ になり、緩速ろ過における生物膜の重要性が示される。大腸菌は生物ろ過膜の付着面に滞留している時間内に、死滅するか捕食者に捕食されるので、その減少は、付着に加えて死滅や捕食にも影響される。

生物ろ過膜が形成されるまでは、ある程度の成熟 (ripening) 期間が必要となり、その期間は、原水の水質、ろ過速度やその他の因子に影響される。ある条件下での最大量まで生物ろ過膜が発達すると、そのろ過池は成熟 (mature) しているといわれる。生物ろ過膜の発達最大量は、有機物などの栄養制限 (nutrient-limited) の水では、栄養が豊富 (nutrient rich) な水よりかなり少ないことが示されている。大腸菌群の除去率に関して、栄養制限の水を利用する緩速ろ過の場合、生物ろ過膜が成熟してから $2\text{-log}(99\%)$ の除去率が期待されるが、栄養豊富な場合は $3\text{-log}(99.9\%)$ 、場合によっては $4\text{-log}(99.99\%)$ も期待される。

ろ過膜の特性は、条件により大きく異なり、非生物的なろ過膜が形成されることもある。コロラド州 Empire のろ過池のろ過膜は、厚さ 1mm で、軽く懸濁し易い黒い炭酸塩の沈積

物 (deposit) である。ここでは、原水濁度が 0.5 度を超えることはほとんどない。Schuler からも、ペンシルバニア州で緊密にパックされ、砂に付着していないろ過膜について報告している。ろ過膜の削り取りを 4 月に行い、続く 75 日の稼働ではろ過膜内に生物学的な増殖は見られなかったが、砂層の表面には多様な生物相のズーグレアがみられたとのことである。コロラド州立大学のパイロットプラントでは明確な生物ろ過膜の形成はみられなかったが、表面の削り取りにより、損失水頭が回復したことから、その有効性が示されたとしている。

生物ろ過膜がズーグレア状の場合、浄化に基本的な役割を果たすが、まれなケースとして炭酸塩沈積物の場合、その下の砂層のズーグレアの成熟度が重要となる。

2.1.2 生物ろ過膜と損失水頭

生物ろ過膜は損失水頭の上昇の原因となり、清掃により回復する。

生物ろ過膜の厚さは損失水頭に関係するが、両者が比例するとは限らない。生物ろ過膜が削り取りなど清掃により除去された後、ろ過層の損失水頭は初期の清浄ろ過層のレベル (clean-bed level) までに戻る。ろ過継続の最終段階では、損失水頭はろ過池の高さで許容されるだけのレベルとなる。生物ろ過膜の特性が何であれ、ある種の沈積はどの緩速ろ過池でも起こり、損失水頭の上昇の原因となる。

【維持管理】 生物ろ過膜の除去により損失水頭が回復する。

2.1.3 粒子除去における生物ろ過膜と砂層の相対的な役割

生物ろ過膜及び砂層は粒子除去や有機物分解に寄与している。生物ろ過膜が生物学的に成熟していれば、その役割は大きくなるが、成熟していなければ、砂層がより重要となる。

緩速ろ過では、ほとんどの粒子除去は生物ろ過膜で起こるといわれている。しかし、砂層も一定の役割を果たすとの報告もある。Bellamy らによれば、大腸菌群の除去率は、ろ過速度 0.12m/hr で、成熟した生物ろ過膜及び砂層 (mature sand bed) の場合 3-log で、生物ろ過膜を削り取った後でも 2-log であることから、成熟した砂層が除去に大きく寄与していた。また他の研究では、ろ過池に栄養塩を添加した実験を行い、大腸菌群の除去率が、未添加のろ過池の 2-log に対して 3-log となった。ろ過池に添加した栄養塩により砂層の生物学的な成熟速度が加速され、全体的な成熟度が上がったと考えられる。

ろ過層の上端は細菌の生育密度が最も高く、粒子除去に最も効果的な部分である。Hazen は、ろ過層表面で 10^6 個/g の細菌が生育し、深さと共に指数関数的に減少し、2cm の深さで 10^5 個/g になると報告している。一方、Collins らは、表面で 10^9 個/g から 30~45cm で $10^6 \sim 10^7$ 個/g になると報告している。生物ろ過膜にせよ砂層にせよ、代謝に寄与する細菌

(metabolizing bacteria) が存在しているところで、種々の有機物や栄養塩が除去されるが、生物ろ過膜と砂層がどの程度の寄与をするかは一定ではない。生物ろ過膜が生物学的に成熟していれば、その役割は大きくなるが、成熟していなければ、砂層のズーグレアがより重要となる。

【維持管理】 生物ろ過膜の形成が十分でない場合、砂層のズーグレアの成熟が重要となるので、生物ろ過膜の清掃時には、損失水頭の回復を確保した上で砂層上部のズーグレアを残すこと、必要以上に乾燥させてズーグレアを変質させないことが重要である。

2.2 ろ過膜での藻類の効果

藻類は、厳密にはろ過メカニズムに関与しないが、ある種の藻類は生物ろ過膜の作用に重大な影響を及ぼし、場合によっては、有効なものでもあり障害になることもある。

2.2.1 原水とろ過池水の藻類

ろ過池で優占する藻類は、原水の水源で優占していた藻類とは異なる。

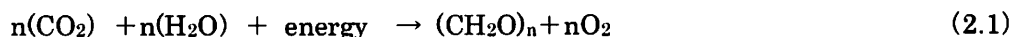
表流水は藻類を含んでおり、流水、河川や湖での自然の再生産プロセス (natural reproductive process) に寄与している。水域の環境条件 (pH、温度、化学組成、濁度、栄養塩の濃度、流れの深さと速度、光の量、その他の因子) により、異なった種(species)が優占 (predominate) する。浅く流れの速い流水でみられる藻類は、その流水が流入する深い池や貯水池で優占する藻類とは同じものではない。これと同じように、緩速ろ過池は水源とは異なる環境であり、そこで優占する藻類は原水の水源とは異なるものになる。加えて、伏流水や地下水を水源とする場合でも、ろ過池水特有の藻類が優占する。原水及びろ過池水の藻類は、溶存酸素濃度の変動やろ過水への漏出など、ろ過の効率に影響を与える。

2.2.2 ろ過膜藻類の基本的な作用－光合成と分解

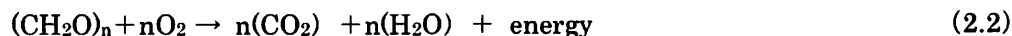
ろ過膜藻類は、光合成により増殖し、死により細胞が分解する。

ろ過膜では、主に付着性藻類が繁殖するが、ろ過池水同様その環境条件に応じたものが優占する。藻類は、独立栄養生物 (autotrophic organism) のため光合成 (photosynthetic process) により増殖する。光合成には光が必要となるので、ろ過池が覆蓋されている場合には、不活性な状態となる。非覆蓋のろ過池の場合でも、原水の濁度が高く光が遮断されるような場合には、藻類の増殖は阻害される。

緩速ろ過の浄化プロセスに関して最も重要な藻類の特性は、水中のミネラル分 (二酸化炭素、硝酸、リン酸) から有機物の細胞物質を作り上げることである。炭素のサイクルは、次の式で示される。



また、(2.1)の逆の反応が、藻類の死とともに細胞物質が放出されてろ過層の細菌類に消費されるときに起こる分解 (decomposition) である。



両反応のどちらが大きいかは、藻類が、群集 (population) として、成長状態か定常状態か、あるいは衰退状態にあるかによって決まる。

2.2.3 光合成と分解による水質変化

藻類の光合成により、溶存酸素濃度が増加し、二酸化炭素が減少する。また、二酸化炭素の減少に伴い、炭酸塩が沈殿することがある。夜間は分解による逆反応が起こり、ろ過膜が嫌氣的になると、水質障害が発生する。

藻類が活発な成長期にある限り (温帯地方 temperate climate の春季や夏季、熱帯地方 tropical area ではより長い期間)、反応 (2.1) が支配的になり、酸素が増え、二酸化炭素が減少する。酸素濃度は、時には理論的な飽和濃度の 3 倍にまでなりうる。一方、二酸化炭素が減少すると (2.3) 式によりアルカリ性となる。この場合、大気中から二酸化炭素が溶け込むとともに、(2.4) 式のように重炭酸イオンが解離(dissociate)して二酸化炭素が補給される。後者は、水の硬度 (hardness カルシウムおよびマグネシウム) が高い場合に重要となり、不溶性の炭酸塩が沈殿する。原水中の硬度が高い場合には、藻類の繁殖による炭酸塩の沈殿 (bio-induced carbonate precipitation) が増加するにつれてろ過閉塞が起こるので、ろ過層表面を定期的に除去する必要がある。

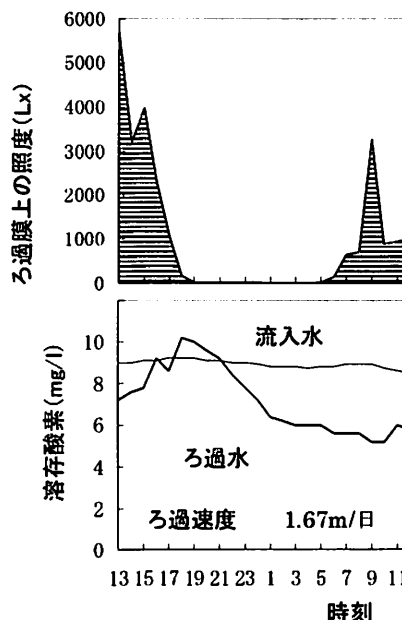


藻類群集が定常状態になると、式 (2.1) と (2.2) のバランスがとれた状態になる。式 (2.1) の光合成は太陽光を必要としているが、式 (2.2) による有機物の分解は常に起こりうる。このため、昼間には溶存酸素濃度が増え、夜間には溶存酸素が減少する日周変動が起こり、厳しい条件下では、夜間、生物ろ過膜が嫌氣的な状態になることがある。この影響は、有機物の蓄積が多くなる生物膜成熟後には、ろ過速度が遅いほど大きくなるので、ろ過速度を遅くすることあるいはろ過を中断することは避ける必要がある。

[維持管理] 生物ろ過膜成熟後には、ろ過速度を遅くすることあるいはろ過の中断は避ける。

—ろ過膜上の日射とろ過水の溶存酸素の変動—

—名古屋市の事例（参考資料7より）—
ろ過水はろ過膜部分通過後約6時間



—ろ過速度とろ過水の溶存酸素の低下—

—名古屋市の事例（参考資料7より）—
生物ろ過膜成熟後は、ろ過速度が遅いほど、
溶存酸素の最低値は低くなる。

ろ過速度 (m/日)	DO 最低値 (mg/l)
1.67	5.2
1.25	4.6
0.83	1.6
0.42	0.0

2.2.4 ろ過膜藻類の浄化への寄与

藻類の光合成による溶存酸素は、ろ過膜を好氣的に保ち、有機物はろ過膜成熟期間を短縮する。

藻類の光合成により作られる酸素は、ろ過膜の好氣的な状態を保つのに寄与し、有機物やアンモニア、溶存マンガンの生物化学的な酸化を可能とする。酸素により酸化的な活性が高くなると、原水に含まれる有機物質が分解される機会がそれに応じて増加していく。

また、同じく産生される有機物は、ろ過膜表面あるいはろ過層上部の砂粒子上のズーグレアの形成を促進し、ろ過膜成熟期間を短縮する。原水水質が良く有機物濃度が低い場合ほど、この藻類による効果は相対的に重要となる。藻類の産生する新しい有機物は、古い有機物より分解され易い。ろ過水中の平均溶存酸素濃度は、覆蓋のろ過池と非覆蓋のろ過池でほとんど違いがないが、非覆蓋ろ過池の酸素消費量は覆蓋ろ過池の約10倍という報告もある(1.5mg/Lに対して15 mg/L)。これは、前述の式(2.1)と(2.2)に示した炭素サイクルに加えて、非分解性有機物が分解性有機物に変換されることにもよる。

2.2.5 藻類による障害

水温低下や水質変化によるろ過膜藻類の一時的な大量死は、障害を引き起こす。加えて、ろ過継続日数を短くすることもある。
また、ろ過池水の浮遊藻類(植物プランクトン)も制御が必要である。

北部気候帯では、水温は秋には低下し、ろ過膜藻類の生育条件が悪くなるので藻類の死滅を引き起こすことがある。また、別の理由により（例えば、殺藻性 algicidal の工場廃棄物が原水中に混入するなど）生育条件が悪くなると、藻類の大量死が起こることもある。これらにより、分解され易い有機物の放出、酸素の消費、二酸化炭素の生成が起こり、嫌気的な状態となる可能性が増し、二酸化炭素濃度が高くなると pH 値がより低くなる。たとえば、ろ過水の溶存酸素濃度が十分でも、ろ過層の一部が死んだ藻類に覆われると、その直下で還元が起こり、嫌な味をつける油状物質 (etheric oil) が産生されることがある。この場合、ろ過停止及びろ過池の清掃が必要となる。このような状態は、1つ以上のろ過池で同時に起こるので、ろ過水の量と質の確保に重大な問題を引き起こす。

藻類が非常に多く繁殖することの潜在的なリスクとしては、頻繁にろ過池清掃をする必要性が発生し、ろ過停止期間の割合が増加し、清掃のための労力もそれだけ必要となることである。温帯地方では、このリスクが特に温度上昇期に大きくなり、突如藻類の大繁殖が起こり、温度下降期にはそれらが大量死することがある。熱帯地方では、他の気象条件や季節変動で、同様な現象が起こりうる。

また、糸状のろ過膜藻類の光合成により、多くの微細気泡が藻類に付着することで浮力が付き、藻類が砂層から離れて浮上することがある。水面近くでは気泡が大気中に揮散するので再び沈降するが、水流や風向によりろ過池の特定の場所に集積すると、堆積したろ過膜藻類が腐敗することがある。このため、浮上した藻類を越流管から排出させるなどの作業が必要となる。

また、ろ過池水で浮遊藻類（植物プランクトン）が繁殖することがある。ろ過池の滞留部分や走光性により表面に集積する場合は、ある種の連続培養系となるので、原水中の窒素やリンなどの栄養塩が少なくても大量繁殖することがある。また、ろ過池を清掃するための落水の際に砂ろ過層に浮遊藻類が侵入し、生物ろ過膜を清掃した後もろ過層上部に残り、充水する時再びろ過池水に浮遊し大量繁殖する例もみられる。浮遊藻類は、分解による酸素消費、漏出による濁度検出や着色障害などの影響がある。このため、越流管からの排出やろ過速度を高く保ち滞留部分や表面での集積を防ぐなどにより、その量を制御することが必要となる。また、ろ過池清掃において、浮遊藻類が砂ろ過層上部に残らないように留意する必要もある。

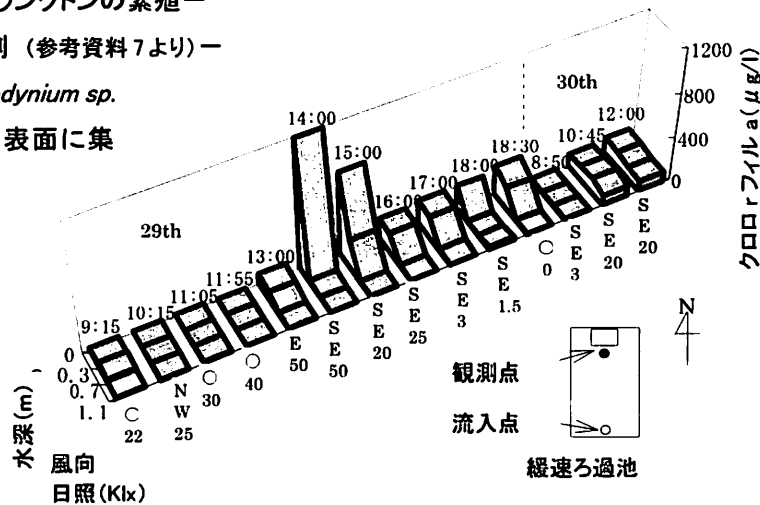
[維持管理] 浮上したろ過膜藻類は、越流管から排出させる。ろ過池水の浮遊藻類は、越流管からの排出やろ過速度を上げて制御をする。

ろ過池水での植物プランクトンの繁殖

— 名古屋市での事例 (参考資料7より) —

走光性のある *Gymnodinium sp.*

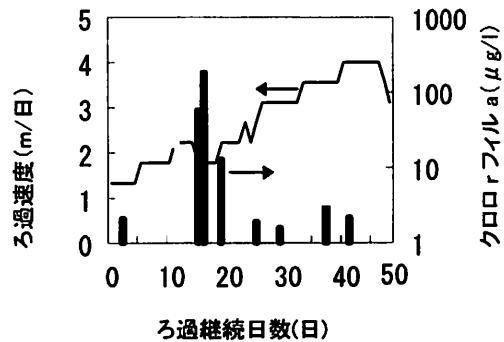
が光と風により池の水表面に集積する。



ろ過速度とろ過池水での植物プランクトンの繁殖

— 名古屋市での事例 (参考資料7より) —

ろ過速度が増加し下向きの流速が増大すれば、植物プランクトンの増殖は抑制される傾向がある。



2.2.6 ろ過膜藻類の種類

糸状藻類は、濁質の捕捉、ろ過閉塞の防止など効果的なろ過膜を形成する。

糸状藻類(filamentous)は活性の高い生物ろ過膜を形成し、捕捉のための担体となるズーグレア量を増加させ、細菌類やその他の生物の増殖を促進することで、捕捉や吸着効果をさらに高める効果がある。生物ろ過膜が十分形成されていれば、砂ろ過層に到達する懸濁粒子量を減少させるので、ろ過池清掃までの時間を長くすることができる。さらに、生物ろ過膜に到達した大腸菌や病原微生物を捕食しその数を減少させる原生動物や他のより高等な生物に、よい生育環境を提供する。いくつかの研究によれば、この藻類そのものが病原微生物など原水中の細菌類に有害な物質を産生するので、細菌の残存可能性を低下させるとも言われている。

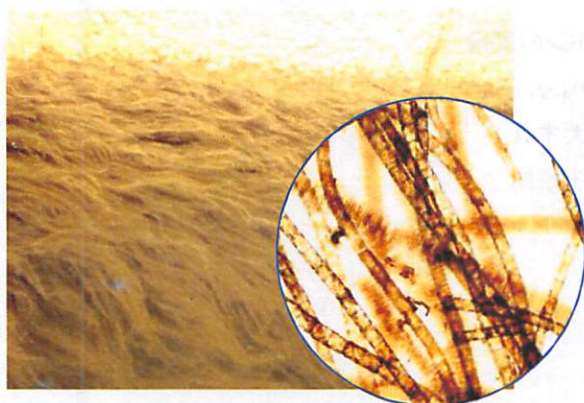
糸状藻類が主体の場合、密に織り込まれ強度のある繊維のようなマットを形成する。太陽光が十分の場合、純酸素の気泡がこのマットで作られ、その浮力を増加させることで、付着していた砂粒子と共にろ過層上部から持ちあげられる。これにより、ろ過抵抗が減少し、時には急激にろ過速度が増加することがあるが、この場合既にろ過砂部分にもズーグレアは形成されており、ろ過層深く濁質が混入することは少ないと考えられる。

一方、珪藻のような小型藻類が優占する場合、マットは形成されにくくろ過表面の抵抗が増す。このような藻類が大量繁殖すると急速なる過閉塞が起こり、ろ過継続時間が短くなり、維持管理上の問題やろ過水水質の低下を引き起こす。

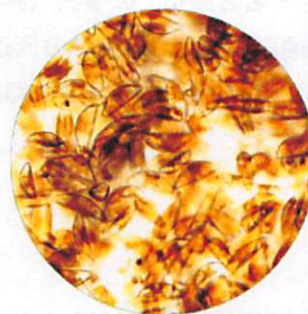
藻類の繁殖や優占種は、原水水質や気象条件などに影響される。太陽光、栄養塩、適正な温度があれば、増殖は促進される。二酸化炭素、硝酸塩、リン酸塩のようなミネラル分を含む低濁度の清澄な水は、藻類増殖に最適な水である。一般に、他のミネラル分に比べてリン酸塩が相対的に少ないというケースが多い。というのは、水源の水のリン含有量が少ないか、リンが粘土粒子への付着や鉄との沈殿などにより水中から除かれるからである。

—ろ過膜藻類の種類—

—名古屋市での事例（参考資料7より）—



糸状藻類 *Melosira varians* のろ過膜と顕微鏡写真



珪藻 *Cymbella minuta*

—藻体に吸着される粒子— —名古屋市での事例（参考資料7より）—

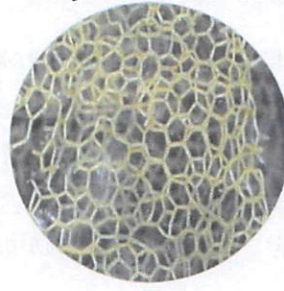
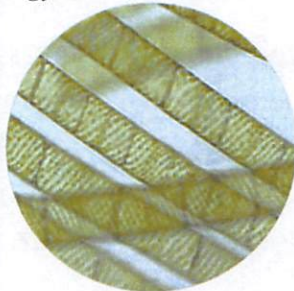
同じ糸状藻類でも、*Melosira varians*は藻体に粒子を吸着させやすく、粒子除去に効果的なろ過膜を形成する。

100 - 強熱減量 / (1 - C)、Cは藻体内のケイ酸含有量 0.32(M. varians) 0(その他)

ろ過膜藻類の種	粒子吸着量(%)
<i>Melosira varians</i>	58.4
<i>Spirogyra</i>	6.4
<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	0.4

Spirogyra アオミドロ

Hydrodictyon reticulatum アミミドロ



2.2.7 ろ過池の覆蓋

ろ過池の覆蓋は、藻類に起因する障害の防止、凍結防止、水面への落下物による汚染防止、ろ過池清掃が天候に左右されないなどの効果がある。一方で、藻類による浄化への効果が失われる。

温帯や寒帯では、藻類による障害に加えて、冬季に水面が凍結する可能性もある。このため、ろ過池を覆蓋して、太陽光を遮り藻類が繁殖しないようにすることが行われている。しかしながら、このことは構造物の建設費用も考慮すると、特に温帯地方ではあまり考えるべきではない。藻類には、いろいろな長所もありうるからである。

ろ過池の覆蓋により、ろ過継続期間も長くなり安定し、ろ過池清掃も、昼夜を問わず、あるいは荒天時であっても可能となる。覆蓋ろ過池に藻類がない場合は、幾分浄化機能が低下する可能性があるが、これを補う長所として、風によってもたらされる汚染物質や鳥による汚染を排除できるという利点がある。

藻類の繁殖が起こる熱帯の条件下では、藻類の大量死滅が少なく、氷結も起こらないので、ろ過池清掃は定期的に行えばよく、その頻度も高くはならないので、ろ過池覆蓋の長所もあまりない。ろ過池清掃に伴い、生死にかかわらず全ての藻類は除去される。新しい藻類が原水によりもたらされ式(2.1)による反応が支配的となり、溶存酸素が増加し有機物が分解されやすくなる。同時に、二酸化炭素含有量が減少することで水の腐食性が低下し、栄養塩や有機物を減少させて、ろ過への負荷を減少させる。非覆蓋のろ過池の生物ろ過膜による捕捉と浄化機能は、水道水の衛生性 (hygienic quality) を保ち、ろ過閉塞を減少させ、ろ過継続時間を長くするという点で、総合的なろ過効率に寄与している。

2.2.8 パイロット実験の必要性

藻類の種類や成長速度は予測しがたく、経験がなければ、設計前にパイロット実験が必要である。

優占種や藻類の成長速度を支配するいくつかの変数は、ある特定の場所での経験を基に想定する場合を除いて、本質的には予測することができない。経験がなければ(すなわち、同じような条件で現在ろ過池が稼働していなければ)、大規模な実施設計を設計する前にパイロットプラントで経験を重ねることは価値がある。研究は、全ての季節や気候が考慮できるように、1年を通して継続する必要がある。

2.3 生物ろ過膜の小動物の影響

生物ろ過膜には、付着性のろ過膜藻類の他、原生動物やユスリカなどの小動物が生息している。これらは、緩速ろ過の浄化機能に寄与するとともに、同時に障害を起こすこともある。

2.3.1 小動物の働き

小動物は、細菌類の捕食や有機物の分解無機化により、緩速ろ過の浄化機能に寄与している。また、生物ろ過膜に蓄積した有機物の摂食により、損失水頭が改善することがある。

生物ろ過膜には、原生動物、ユスリカやミズムシなどの節足動物、ミズミズなどの環形動物、線虫類などの袋形動物が生息している。原生動物は細菌類を捕食し、さらに大型の動物に捕食される。また、ユスリカは、ろ過膜上の藻類やろ過膜に蓄積した有機物を餌として摂食する。ミズミズもろ過膜に蓄積した有機物を餌として摂食する。線虫類は細菌類を摂食するといわれている。

これらの食物連鎖は、細菌類の除去や有機物の分解無機化に寄与するばかりでなく、摂食により生物ろ過膜上に微細な穴をあけ、損失水頭を改善する働きもある。また、ユスリカのように羽化して緩速ろ過池から飛散する昆虫類は、有機物を系外に取り出すという効果もある。また、緩速ろ過池に魚類が生息する場合は、これらの小動物を捕食し、植物連鎖を進めるとともに小動物による障害を抑える作用もある。

2.3.2 小動物による障害

小動物がろ過水中に混入すると、大きな水質障害となる。

小動物の共通の障害としては、ろ過水への混入である。これらの動物は、その大きさから通常はろ過層を通過することはほとんどないが、ろ過池の削り取り時にろ過層の下端まで水位を下げると小動物が砂利層まで退避し、ろ過水に混入することがある。また、壁面短絡流により、ろ過水に混入することも考えられる。

線虫がろ過水に混入した場合、塩素消毒に抵抗性があるので、消化器官に存在する一般細菌や大腸菌が残存する可能性もある。また、緩速ろ過池が都市部にある場合、羽化したユスリカの飛散が周辺住宅地に影響することがあるので、その対策が必要となる。

2.4 緩速ろ過による水質変化

緩速ろ過では、本来の目的である粒子の除去の他、生物ろ過膜及びブーズグレアによる種々の溶存物質の変化も起こっている。粒子には、濁度で示されるシルト・粘土成分に加えて懸濁態の重金属類や微量化学物質も含まれ、ろ過により濁度が低下するとこれらの物質も低減化することになる。また、大腸菌などの細菌類や藻類も懸濁物質のひとつであり、それらは粒子除去メカニズムに加えて、捕食による不活性化の効果もある。溶存物質には、生物酸化により除去されるものの他に、付着による減少、藻類の光合成に起因する日周変動などの変化を示すものがある。

2.4.1 粒子の除去

緩速ろ過池の粒子除去率は、2log~3log 程度である。生物ろ過膜だけでなく、砂層も補完的に機能する。

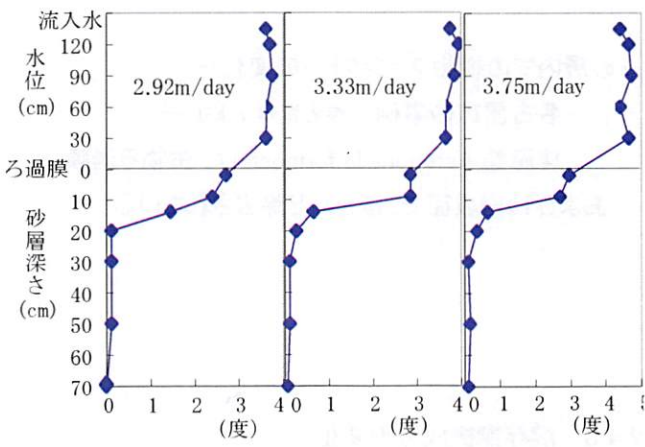
1.2 および 1.3 で述べたメカニズムにより、粒子は除去される。緩速ろ過の粒子除去率は、原水に含まれる粒子数および粒径分布により異なり、2log~3log 程度である。このため、クリプトスポリジウム対策で求められている、ろ過水濁度 0.1 度以下を維持するためには、原水濁度 10 度以下が目安となる。原水濁度が 10 度を超えるような場合には、普通沈澱あるいは粗ろ過など濁度低減化のための前処理が必要である。

また、粒子除去に生物ろ過膜と砂ろ過層がどの程度寄与しているかは、生物ろ過膜の成熟の程度とろ過速度に影響を受ける。このため、条件によっては、砂層が補完的に機能するので、安全を考慮して砂層の厚さを確保する必要がある。この場合、砂層内に粒子が保持されるので、1回の砂層表面の削り取りによる清掃では除去できないこともあるが、ろ過速度の急変などによる脱離を防ぐことで、ろ過水への影響を最小限とすることができる。

[設計・維持管理]
 緩速ろ過では、ろ過水濁度 0.1 度以下を維持するためには、原水濁度の目標値は 10 度以下である。これを超える場合には、濁度低減化のための前処理施設が必要である。
 粒子除去の補完として、一定程度以上のろ過層厚さが必要である。

一 緩速ろ過による濁度変化の例一
 一 名古屋市の事例 (参考資料 7 より) 一

徐々にろ過速度を増加させた場合の砂層内の濁度分布。砂層内への濁度の侵入は生物ろ過膜の成熟度及びろ過速度に影響されるが、概ね砂層 20 cm までで、濁度が除去されている。



一 緩速ろ過による粒子除去の例一
 一 名古屋市の事例 (参考資料 7 より) 一

粒子径 (μm)	2~3	3~5	5~7	7~10	10~15	15~
除去率(log)	2.60	2.60	2.69	2.65	2.64	2.16

2.4.2 細菌類及び藻類の除去

原水に含まれていた細菌類、藻類、腸管ウイルス及び原虫類も除去される。

緩速ろ過により、原水に含まれていた大腸菌などの病原性細菌及び植物プランクトンなどの藻類も除去される。この場合、生物ろ過膜及び砂層への付着のみならず原生動物による捕食の効果もある。また、腸管ウイルス (enteric viruses) やクリプトスポリジウムのオーシスト (Cryptosporidium Oocyst) などについても、同様のメカニズムによる除去が報告されている。

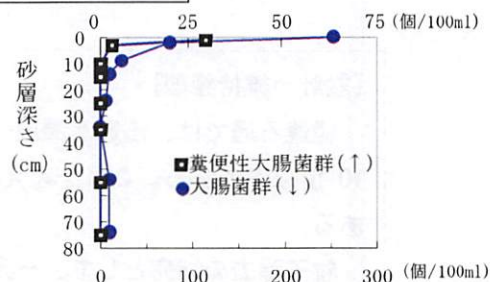
緩速ろ過による除去率 (参考資料 8 より)

対象	除去率
大腸菌	1-3 log
腸管ウイルス	2-4 log
ジアルジア・シスト	2-4+ log
クリプトスポリジウム・オーシスト	>4 log

一砂層内での大腸菌群および糞便性大腸菌群の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

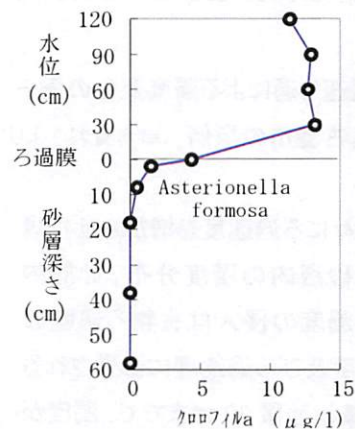
生物ろ過膜および砂層表面で、ほとんど除去されている。



一砂層内での植物プランクトンの変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

珪藻類 *Asterionella formosa* は、生物ろ過膜および砂層表面で、ほとんど除去されている。



2.4.3 溶存無機成分の変化

ろ過膜藻類の光合成により、ろ過水中の栄養塩、アルカリ土類金属および総アルカリ度が日周変動する。
 硝化により、アンモニアおよび亜硝酸が除去される。
 生物酸化により、マンガンおよび鉄が除去される。鉄の還元的イオンが存在しない場合は付着により除去される。

アルミニウムと亜鉛は水酸化物形成により除去されるが、両性金属であるため pH 依存性が高い。

アルカリ金属類および陰イオン類は緩速ろ過過程でほとんど変化しない。

(1) ろ過膜藻類の光合成による栄養塩の日周変動

ろ過膜藻類は、窒素、リンなどの栄養塩を取り込み、光エネルギーを利用して炭酸ガスから有機物を生産する。

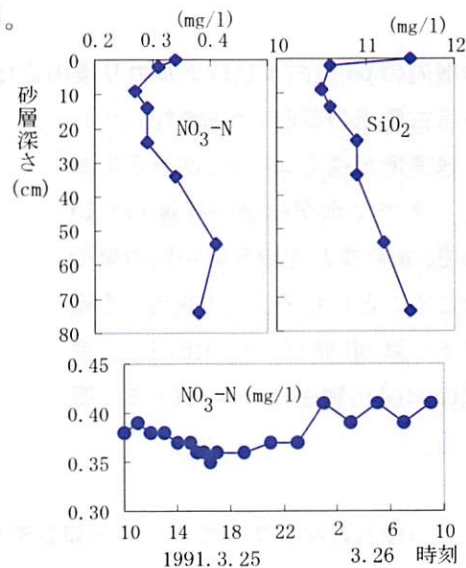


光合成は昼間のみ起こり、呼吸 (respiration) や分解により逆反応が起こるので、ろ過水中の溶存酸素や栄養塩濃度は日周変動する可能性がある。窒素では硝酸態窒素の日周変動が顕著であり、後述のように亜硝酸態窒素およびアンモニア態窒素は硝化によりろ過水中で検出されなくなる。リンは、オルトリン酸の鉄やカルシウムとの反応もあり、微量の場合日周変動は顕著ではない。また、珪藻が主体のろ過膜の場合には、溶性ケイ酸も日周変動するが、ろ過砂からの溶出の影響を受けることもある。

—硝酸態窒素と溶性ケイ酸の砂層内の変化とろ過水の日周変動—

—名古屋市の事例 (参考資料 7 より)—

水は下向きに流れるので、砂層内の値は、その場所での変化より、ろ過膜における変化の時間的変動を反映したものになる。



(2) ろ過膜藻類の光合成に伴う炭酸カルシウムの沈殿によるアルカリ土類金属 (カルシウム、マグネシウム、ストロンチウム、バリウム) および総アルカリ度の日周変動

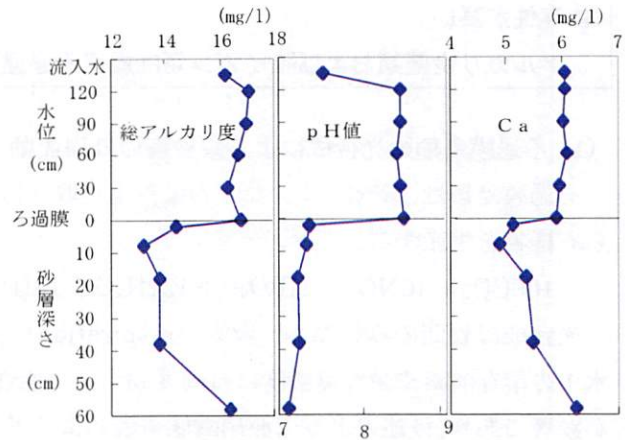
ろ過膜藻類が光合成を行う時、水は下向きに流れるので、必要な二酸化炭素は大気からではなく(2.4)式により補給されるので、光合成に引き起こされる炭酸カルシウムの沈殿 (bio-induced carbonate precipitation) により、ろ過膜直下で総アルカリ度 (重炭酸イオン HCO_3^-) とカルシウムが減少する。

一般に、光合成により水中の二酸化炭素が減少すると pH 値が上昇するが、炭酸カルシウムの沈殿により二酸化炭素が供給される場合には、pH 値は変化しない。また、マグネシウム、ストロンチウムおよびバリウムのアルカリ土類金属は、カルシウムと共沈して炭酸塩の

沈殿を生成するので、これらも日周変動する。

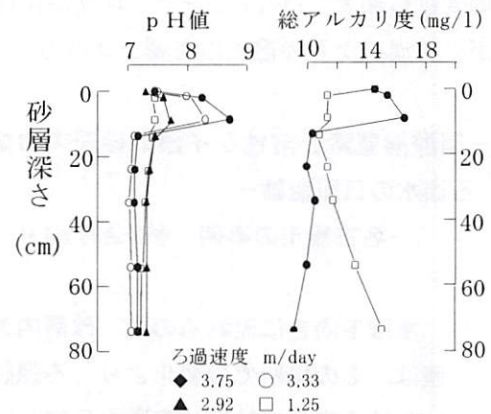
ろ過膜藻類の光合成に伴う炭酸カルシウムの沈殿

名古屋市の事例 (参考資料 7 より) ーろ過池水で植物プランクトンが繁殖しており、その光合成では pH 値の上昇が起こるが、ろ過膜藻類の光合成の場合は炭酸塩の沈殿反応を伴うので pH 値が下がっている。



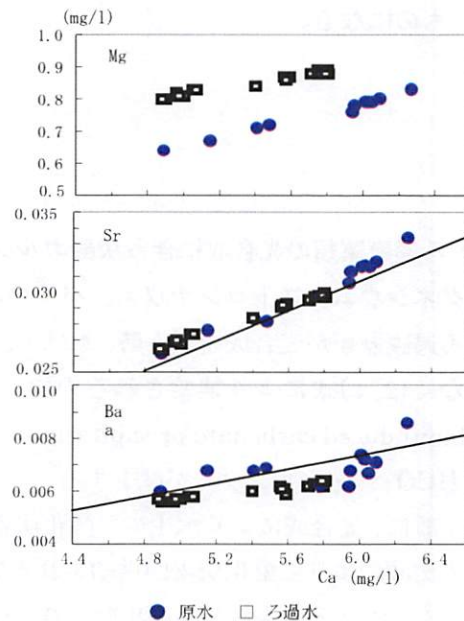
一砂層内の pH 値および総アルカリ度の変化一

名古屋市の事例 (参考資料 7 より) ーろ過速度が速くなると、沈殿反応が起こるまでに水が砂層内を進んでいくので、光合成と沈殿反応が別の場所で行われることになる。この場合、ろ過膜直下に高 pH 値ゾーンが出現し、金属類の水酸化物生成による除去に寄与する。



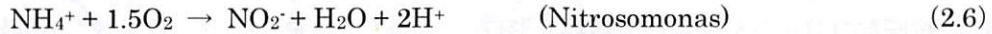
一カルシウムとマグネシウム、ストロンチウム、バリウムの相関関係一

名古屋市の事例 (参考資料 7 より) ーマグネシウム、ストロンチウム、バリウムは、カルシウムと相関関係があり、ろ過池で同じ挙動を示す。



(3) 硝化によるアンモニアおよび亜硝酸の除去

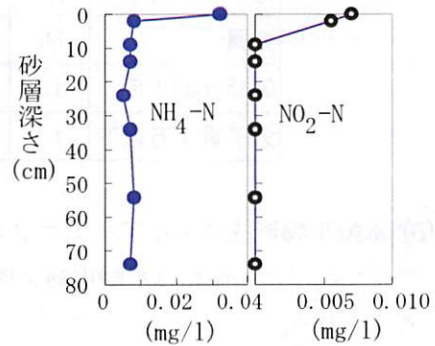
生物ろ過膜が好氣的に保たれていると、アンモニア態窒素および亜硝酸態窒素は、硝化菌の作用により硝酸態窒素に変わるので、ろ過水中の濃度は極めて低濃度となる。



アンモニア態窒素は、塩素と反応し浄水の残留塩素を低下させるので、その硝化による除去は浄水処理上重要である。また、硝化反応は酸素を必要とするので、アンモニア態窒素が高濃度になると、溶存酸素濃度が低下し、ろ過水中にアンモニアが含まれるようになる。硝化の酸素消費量から計算するとアンモニア態窒素で 2mg/L 程度、正常な処理のためには 0.5mg/L の原水濃度の限界値が示されており、緩速ろ過が汚濁の少ない原水を必要とする理由の一つである。また、ろ過膜有機物の分解によるアンモニア態窒素の供給もあり、嫌気的な状態を作らないような管理によってこの影響を抑える必要がある。

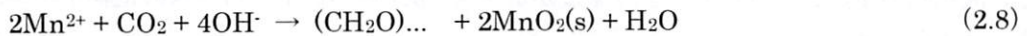
一砂層内でのアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)
および亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) の変化—
—名古屋市の事例 (参考資料 7 より)—

原水の生物利用可能な有機物量 (BOD) が低く、
アンモニアの酸化は生物ろ過膜で起こり、少し
遅れて亜硝酸の酸化が起こる。



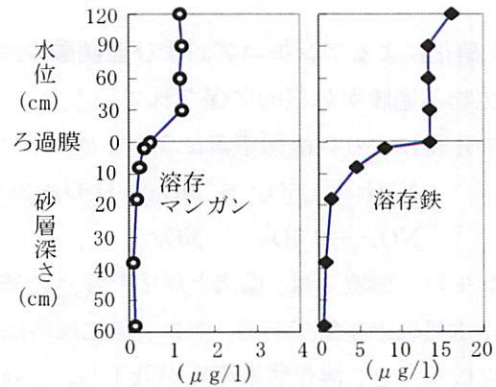
(4) 生物酸化によるマンガンと鉄の除去

緩速ろ過により、溶存状態のマンガンと鉄が生物酸化されて、水中から除かれる。その反応は、好気細菌の関与により、還元的イオン (Mn^{2+} 、 4Fe^{2+}) が酸化されて不溶性の酸化物、水酸化物を作ることであり、通常は鉄の酸化の方が速く起こる。



ところが、溶存酸素が十分ある酸化的水中では、 Fe^{2+} は酸化され易いために殆ど残存せず、溶存鉄は微細なコロイドや $\text{Fe}(\text{III})$ とフミン質などのキレート錯体が主体であると考えられている。この場合、緩速ろ過池では、還元イオンの酸化ではなく、コロイドや錯体のろ過膜および砂層への付着や抑留によって溶存鉄が除去されるので、溶存マンガンの酸化除去より遅くなる。

—砂層内での溶存マンガンおよび溶存鉄の変化—
 —名古屋市の事例（参考資料7より）—
 マンガンはろ過膜で生物酸化により除かれる。鉄は、微細なコロイドやキレート錯体を形成しており（分子量1万以上の分画が90%を占める）、生物酸化ではなく付着で除かれている。



溶存金属(0.45 μm 以下)と分子量 10000 以下の成分、両者に差がある成分は、溶存状態ではなく、微細なコロイドやキレート錯体を形成している。 (mg/l)

金属	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li
0.45 μm 以下	0.007	0.011	6.7	0.001	0.010	1.4	0.004
分子量 1 万以下	0.005	0.011	6.6	0.001	0.001	1.5	0.004
金属	Mg	Mn	Na	P	Si	Sr	Zn
0.45 μm 以下	1.1	0.001	6.7	0.020	5.3	0.043	0.003
分子量 1 万以下	1.1	0.001	6.6	0.019	5.3	0.042	0.003

(5) 水酸化物形成によるアルミニウムおよび亜鉛の除去

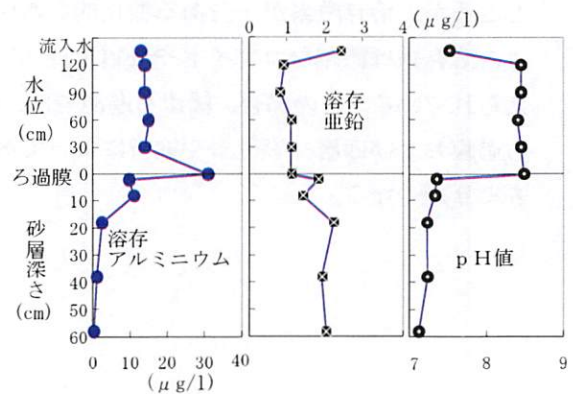
アルミニウムと亜鉛は水酸化物を形成し、pH 値が7付近では、次のような反応が支配的と考えられる。



これらの反応では、両性金属であるアルミニウムと亜鉛の挙動は pH 値に大きく影響される。アルミニウムは、pH 値が上昇するとアルミニウムが溶出により増加し、pH 値が低下すると沈殿および付着により濃度が低下する。亜鉛は、アルミニウムとは逆に、pH 値が上昇すると酸化物の生成および付着により濃度が低下し、pH 値が低下すると水酸化物イオンが生成して水中の濃度が上昇する。

—砂層内での溶存アルミニウムおよび溶存亜鉛の変化—

—名古屋市の事例（参考資料7より）—
 アルミニウムは、高 pH 値によるろ過膜から溶出があり、その後 pH 値の低下と共に減少する。亜鉛は逆の傾向を示し、pH 値の低下と共に砂層内の水中濃度が増加している。



(6) その他の無機物の挙動

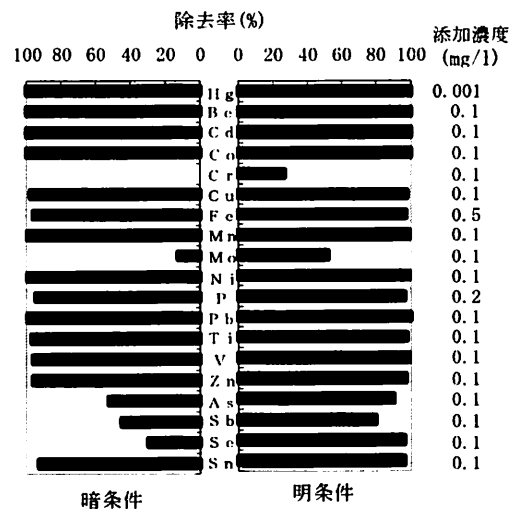
緩速ろ過池では、アルカリ金属類（ナトリウム、カリウム、リチウム）、陰イオン類（塩化物イオン、硫酸イオン、フッ化物イオン）は、ろ過材からの溶出がない限り、ほとんど変化しない。これらは、緩速ろ過池で起こる生物の関与する反応、炭酸塩の沈殿、生物酸化反応、不溶性水酸化物の生成に関係しない物質、あるいは水中での存在量に比べてこれらの反応の寄与が極めて小さい物質である。

重金属で懸濁態のものは粒子とともに除去できると考えられる。このため、水銀など自然水中で懸濁態の割合が高いものは、除去されやすい。また、溶存成分については、鉄、マンガンの酸化物と共沈するもの、鉄のように有機物と錯体を作るもの、不溶性水酸化物を作るものもあり、これらによる除去効果が期待できる。また、負に帯電するオキソ酸イオンを作るもの（ヒ素、六価クロム、モリブデンなど）は除去されにくい。

— 緩速ろ過による重金属類の除去 —

— 名古屋市の事例（参考資料7より） —

緩速ろ過カラム実験による重金属類の添加除去実験。明条件の方が、pH 値の上昇により除去率が高い。オキソ酸を作る Cr (VI)、Mo、As、Sb、Se の除去率が低い。



2.4.4 溶存有機成分の変化

溶存有機炭素は、生分解のみならず付着によっても減少する。
 生物分解により、微量有機化学物質も減少するが、関与する微生物の馴致が必要となる。また、微量有機化学物質のうち疎水性のものほど、懸濁態になり易く除去され易い。

(1) 溶存有機炭素の除去

溶存有機炭素 (DOC: Dissolved Organic Carbon) の除去は、配水管内での細菌増殖を抑制し、消毒副生成物の生成量を減らすという意味で重要である。緩速ろ過には天然有機物 (NOM: Natural Organic Matter) の除去効果があるが、その除去メカニズムは生物分解と付着によるものである。溶存有機炭素について、いくつかの指標が使われている。生分解性溶存有機炭素 (BDOC: Biodegradable DOC) は、微生物による異化 (dissimilation) で、無機化される有機物である。同化性有機炭素 (AOC: Assailable Organic Carbon) は、微生物

に取り込まれる有機物であり、配水管内での細菌増殖に関係する。トリハロメタンなど消毒副生成物の前駆物質として知られているフミン質は、既に生物分解を受けた分解生成物であり、緩速ろ過では主に付着により減少する。

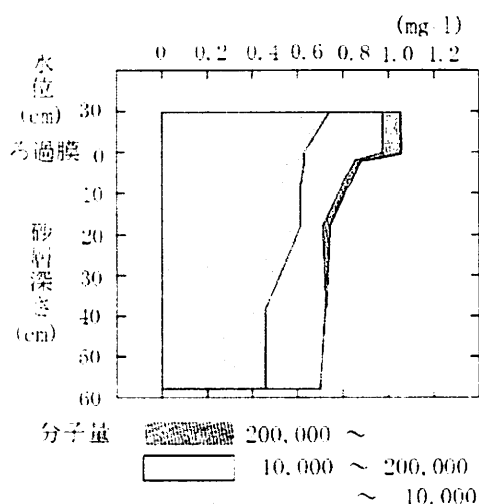
緩速ろ過による有機物の除去率 (参考資料 8 より)

対象	除去率
溶存有機炭素 (DOC)	<15-30 %
生分解性溶存有機炭素 (BDOC)	<80 %
同化性有機炭素 (AOC)	<65 %
トリハロメタン前駆物質 (THMFP)	<20-35 %

一砂層内での溶存有機炭素の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

溶存有機炭素のうち、分子量 1 万以下の有機物が多く、それらは砂層内で徐々に減少していく。20 万以上の高分子有機物のフラクションは少ないが、それらはろ過過程で除かれている。BOD は 1mg/L 程度と低いので、生分解性の有機物は少なく、ほとんどが付着によって減少していると考えられる。



一緩速ろ過によるトリハロメタン生成能の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

緩速ろ過において、懸濁態および溶存態の有機物の減少により、トリハロメタン生成能は減少 (平均 37%) している。

(2) 微量有機化学物質の除去

緩速ろ過では、生物分解と付着により、天然又は人工の微量有機化学物質も除去されることが知られている。生物分解は、対象化学物質の分解に寄与する微生物が生物ろ過膜に存在することで起こるため、微生物の馴致 (acclimation) が必要となる。このため、藻類の産生する物質など比較的長期間暴露されている物質の除去率は高くなるが、人工有機化学物質などの突発的な汚染の場合生物分解は起こり難い。微量有機化学物質の生物分解による濃度変化は、濃度の一次式に従うことが知られている。

$$C_t = C_0 \exp(-kmt) \quad (2.11)$$

ここで、 C_t ：時間 t における微量有機化学物質の濃度
 C_0 ：初期の微量有機化学物質の濃度
 k ：反応速度定数（微量有機化学物質、水温により異なる）
 m ：生物分解に寄与する微生物濃度
 t ：接触時間

条件により除去率は大きく異なるが、生物分解により除去又は濃度が減少する可能性のある微量有機化学物質の例として、藻類産生物質（かび臭物質：2-メチルイソボルネオール、ジェオスミン、藍藻毒：ミクロキスチンなど）、環境ホルモン（エチニルエストラジオール、 17β -エストラジオールなど）、化学物質（フェノール、プロモフェノールなど）、医薬品（ジクロフェナク、ナプロキセン、イブプロフェンなど）、農薬（モリネート、2,4-D など）があり、近年問題となっている物質も含まれている。

一方、付着による微量有機化学物質の除去に関して、疎水性の有機物は、生物ろ過膜および砂層有機物に付着し懸濁態になり易いので、それによる除去効果がある。疎水性の尺度は、水・オクタノール分配係数によって示され、例えば、ダイオキシン類の 2,3,7,8-TCDD は $\log Pow$ が 6.8 で、ほとんど懸濁態になり易いので、緩速ろ過による除去効果は高いと考えられる。一方、トリクロロエチレンは、 $\log Pow$ が 3.4 で、ほとんど溶存状態のままであるため、除去効果は低いと考えられる。（図 2.3）

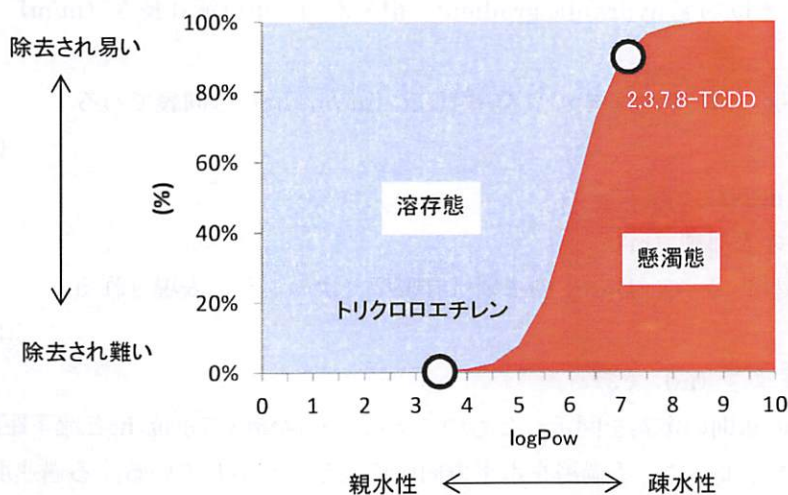


図 2.3 水中での有機物の $\log Kow$ と懸濁態割合

3. ろ過の水理

3.1 Darcy の法則

Darcy の法則は、生物ろ過膜を含む多孔質のろ過材を通過する層流の範囲内の流れに適用できる。緩速ろ過では、ろ過の継続とともに生物ろ過膜が発達し、水の抵抗が増すことで損失水頭が生ずる。この生物ろ過膜を削り取りにより除去すると、損失水頭が初期の清浄ろ過層のレベルまで回復する。この初期損失水頭は普通約 10cm で、ろ過速度、温度、ろ過材の特徴によって変わる。Darcy の法則はこれらの要因を総括的に表現している。

3.1.1 損失水頭

緩速ろ過池では、損失水頭は Darcy の法則で表すことができる。

多孔質ろ過層内の水の流れは、Darcy の法則で示される。

$$U = -k \cdot dh_L / dz \quad (3.1)$$

ここで、U：ろ過速度 (m/hr)

h_L ：損失水頭 (m)

z：ろ過材を通過する距離 (m)

k：ろ過材の透水係数 hydraulic conductivity (m/hr)

dh_L / dz ：水位勾配 hydraulic gradient、損失水頭／単位流れ長さ (m/m)

である。

ろ過速度 U は、しばしば使われる表面負荷率 HLR ($m^3/m^2/hr$) と同義である。

$$HLR = Q / A \quad (3.2)$$

Q：流量 (m^3/s)

A：ろ過層の表面積 (m^2)

均質な多孔質ろ過材について、Darcy の法則は有限項で次のように表現される。

$$U = -k \cdot h_L / z \quad (3.3)$$

ここで、z はろ過層厚さ (m) である。

図 3.1 は、Darcy の法則の定義を図示したものである。ろ過層内で水位 h と流下距離 z がより明確に表示できるように、ろ過層を水平方向に広がるよう示している。ろ過速度 U は、損失水頭 h_L と砂の透水係数 k により、式 (3.3) で決まる。

3.1.2 損失水頭とろ過池の運転

損失水頭を計測しつつ緩速ろ過池の運転を行う。

図 3.2 は、ピエゾメータ piezometer で測定した、生物ろ過膜発達後の砂層内の損失水頭を示している。ピエゾメータは、図に概略を示すようにろ過池の壁に設置する。最大損失

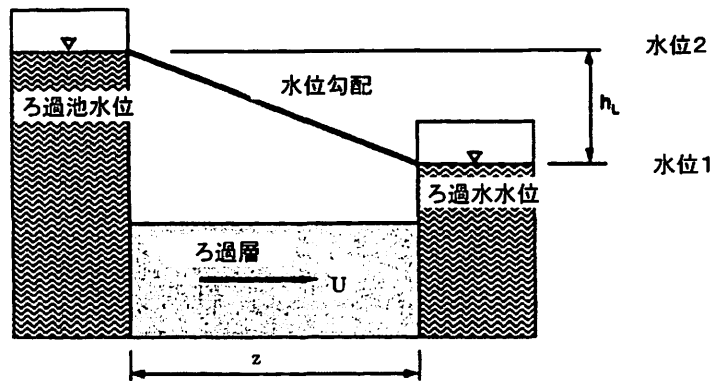


図 3.1 Darcy の法則で定義される変数の関係を示した図(参考資料 1 より)

水頭は、ピエゾメータ A と B で測定され、砂層内の損失水頭は、B, C, D で測定される。図のように、砂層内の損失水頭は生物ろ過膜による損失水頭より小さい。

緩速ろ過池の運転で、ろ過池水位を変化させる場合は次のように行われる。

- ①ろ過池の水位が最大(図 3.2 の 1 のレベル)水位になると、生物ろ過膜の削り取りを行う。
- ②ろ過池の再運転は水位 2 で開始し、全体の損失水頭は水位 2 と水位 5 の差である。
- ③生物ろ過膜が再び発達すると、損失水頭が上昇し、再度水位 1 まで上昇する。

このサイクルを通して、ろ過速度及びろ過流量は一定である。緩速ろ過池を、このサイクルに従って運転すれば、ピエゾメータを使って削り取りの必要な時を予測できる。この際、損失水頭、流量、温度とろ過層の深さを記録することで、固有透水係数 k' (後述)を計算することもできる。万一、あるろ過砂でろ過閉塞が起こる可能性があれば、 k' を測定することでその予測が出来る。

[設計・維持管理] 緩速ろ過池に損失水頭計を設置し、それに基づき運転する。

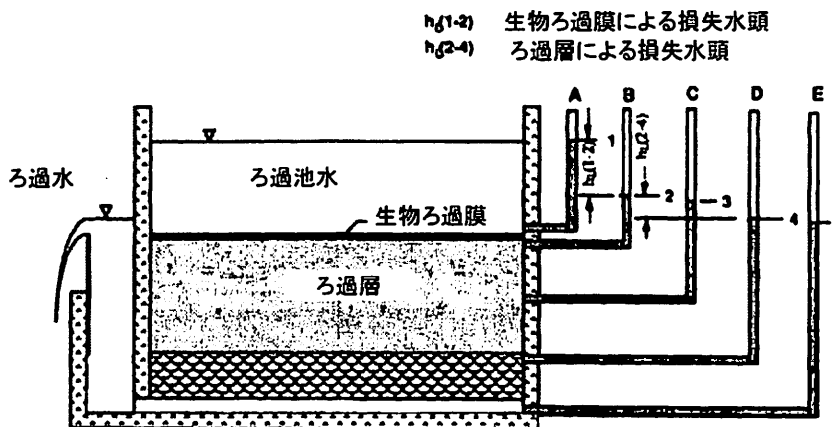


図 3.2 生物ろ過膜が成長した緩速ろ過池の損失水頭プロフィール(参考資料 1 より)

3.1.3 透水係数

透水係数を計算によって求め、ろ過砂による損失水頭を計算することができる。

透水係数 k は、使用するろ過砂の代表サンプルを用いた室内実験で求めるのが最もよいが、推定式を用いて理論的に計算することもできる。例えば、以下のようなものがある。

$$k = 150 \times (0.72 + 0.028T) \times \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^2 \times \phi^2 D_s^2 \quad (\text{m/hr}) \quad (3.4)$$

ここで、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 ε は空隙率 (porosity:ろ過材の全体積に占める空隙の割合)、 ϕ は形状因子 (shape factor:時には球体率 sphericity といわれる)、 D_s は砂粒子の比直径 (specific diameter: m) である。

形状因子 ϕ は、球の表面積に対する同じ体積の平均的な粒子の表面積の割合である。このため、1 以上の値になることはなく、砂粒子が球状でなくなればなるほど小さい値になる。種々の砂粒子の形状因子は、次のようなものである。

形状	球体	ほぼ球体	丸っぽい	摩耗	角張った	粉碎状
ϕ	1.00	0.95	0.9	0.85	0.75	0.65

砂粒子の比直径 D_s は、粒度調整されていない自然の砂の粒子径の平均値であり、個々の粒子の粒径分布を考慮したものである。実際に使用するろ過砂と同じ重量で同じ総面積を有する均一な砂を想定した場合の直径である。

比直径は次のようにして計算できる。あるろ過材の重量を W とし、 W_1, W_2, \dots, W_n の重量分画が、それぞれの直径範囲が D_1 と D_2, D_2 と D_3, \dots, D_n と D_{n+1} の場合、 D_s は以下の関係で計算できる。

$$1/D_s = W_1/W / (\sqrt{d_1 d_2}) + W_2/W / (\sqrt{d_2 d_3}) \dots + W_n/W / (\sqrt{d_n d_{n+1}}) \quad (3.5)$$

比直径を含む計算は、通常急速ろ過で行われているが、緩速ろ過の場合には、砂の粒度調整はより正確に制御する必要がある。緩速ろ過では、ろ過砂は有効径 (effective diameter) と均等係数 (uniformity) で特徴付けられる。有効径の概念は、1892 年 Hazen により導入され、10% のろ過砂が通過する篩の目開きとして定義され、 D_{10} で示されている。同様に、60% のろ過砂が通過する篩の目開きは、 D_{60} で表される。

均等係数 UC は比 D_{60}/D_{10} である。自然の砂は、粒径と度数分布を対数確率紙にプロットしたときほぼ直線になる。比直径と有効径の比 (D_s/D_{10}) を Ψ とすれば、均等な砂で UC が小さいとき (例えば 1~2)、かなりの正確さで次式により計算される。

$$D_s = D_{10}(1 + 2 \log UC) = \Psi D_{10} \quad (3.6)$$

より均等でない砂の場合は、 Ψ は次表で得られる。

UC	1	2	3	4	5
Ψ	1.00	1.60	1.93	2.11	2.21

ここで、メッシュ幅 s とそれを通過する粒子の直径 D との関係について、 D は篩の目開きの形状に多少依存することに留意しなければならない。砂を篩にかける時、四角のワイ

ヤの篩を使用する場合には、 D と s の比は、1.05 (丸っぽい粒子) から 1.2 (長細い粒子) の間にある。通常のろ過砂にあるような楕円形の場合、1.1 の値が仮定されている。

$$D = 1.10s \quad (3.7)$$

この関係と比直径と有効径の比を置き換えると、透水係数を求める式は次のようになる。

$$\begin{aligned} k &= 150 \times (0.72 + 0.028T) \times \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^2 \times \phi^2 \Psi^2 (1.1s_{10})^2 \\ &= 180 \times (0.72 + 0.028T) \times \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^2 \times \phi^2 \Psi^2 s_{10}^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、 s_{10} は、10%のろ過砂を通過させる四角の篩の目開きである。 ϕ と Ψ は上の表から求められる。

ほとんど球形 ($\phi^2 = 0.9$) で、均等係数 UC が 2.0 ($\Psi^2 = 2.5$) のろ過砂で、水温 10℃、空隙率 ε 0.38、の場合、上の式から、有効径 s_{10} が 0.15mm 及び 0.35mm では、透水係数はそれぞれ 1.1m/hr 及び 6.0m/hr となる。後者は大きな値で、ろ過層厚さ 1.2m、高いろ過速度 0.5m/hr においても、初期のろ過抵抗は、0.1m 以下の損失水頭になる。一方、透水係数が 1.1 m/hr と小さいより細かい砂の場合、同じ条件下で、初期の損失水頭は 0.5m を超える。ろ過抵抗を 0.1m 以下に保つためには、ろ過層の厚さは 0.5m に制限され、ろ過水の流出弁を操作して、ろ過速度を約 0.2m/hr に制限する必要がある。

このため、細かい粒径のろ過材を使用する場合は、望ましいろ過水質が得られることを考慮した上で、ろ過層厚さを小さく保ち、(原水が例外的なほど清澄でない限りは) ろ過速度を上げることは避けるべきである。

[設計] ろ過砂の有効径から初期の損失水頭を計算し、ろ過層の厚さ、ろ過速度の許容範囲を計算することができる。

3.1.4 温度の効果

水温が高くなるとろ過速度は大きくなる。また、損失水頭も小さくなる。

式 (3.9) は、Darcy の法則を固有透水係数 intrinsic hydraulic conductivity: k' を用いて表現したものである。

$$U = -k' / \mu \cdot h_L / z \quad (3.9)$$

ここで、 k' : 固有透水係数 (N/m : newton/meter)

μ : ある温度での動粘性係数 dynamic viscosity (N-S/m²)

この式は、砂の透水係数 k は、動粘性係数 μ すなわち流体の特性と、固有透水係数 k' すなわちろ過砂の特性によって決まることを示している。

ろ過速度への温度の影響を説明するために、温度と動粘性係数の関係を式 (3.9) と連携させて考えることができる。例えば、0℃と 25℃の値は次のようである。

$$\mu (0^{\circ}\text{C}) = 1.8 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

$$\mu (25^{\circ}\text{C}) = 0.9 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

固有透水係数 k' は砂ごとに決まる定数であり、ある損失水頭で、ろ過速度 U は、温度が 0 から 25°C に変化すると倍の値になる。即ち、温度は重要な因子ということである。また、 U が一定とすると、損失水頭は 0°C で 25°C と比べて 2 倍となる。

固有透水係数を用いて、コロラド州 Empire の緩速ろ過池で損失水頭を計算した例を次に示す。計算条件は、ろ過層深さ 1.30m、ろ過速度 0.2m/hr 水温 15°C と 0°C、固有透水係数 6.67×10^{-7} である。損失水頭の計算値は、12.5cm (15°C) と 19.5cm (0°C) である。Empire の緩速ろ過池の最終損失水頭は約 1.5m であるため、このうち 13% がろ過砂により使われるということになる。また、損失水頭のほとんど (87%) に、生物ろ過膜が関与するということになる。

3.1.5 初期損失水頭の計算例

[計算式] 損失水頭 h_L は、以下の式により計算できる。

$$h_L = U \cdot Z / k \quad U: \text{ろ過速度(m/hr)} \quad Z: \text{砂層厚さ(m)} \quad k: \text{透水係数(m/hr)}$$

ここで、

$$K = 180 \times (0.72 + 0.028T) \times \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^2 \times \phi^2 \Psi^2 s_{10}^2$$

T : 水温 (°C) ε : 空隙率 ϕ : 形状因子 Ψ : 均等係数に関する係数

s_{10} : 有効径 (mm)

[共通条件] 均等係数 2.0 空隙率 0.4 形状因子 (ほぼ球体) 0.95

[例 1: 有効径の影響] 水温 10°C 砂層厚さ 1m ろ過速度 4m/day

有効径(mm)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
損失水頭(cm)	22.5	5.6	2.5	1.4	0.9

[例 2: 砂層厚さの影響] 水温 10°C 有効径 0.3 mm ろ過速度 4m/day

砂層厚さ(cm)	40	60	80	100	120	140	160
損失水頭(cm)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

[例 3: ろ過速度の影響] 水温 10°C 有効径 0.3 mm 砂層厚さ 1m

ろ過速度(m/day)	1	2	3	4	5	6	7
損失水頭(cm)	0.6	1.3	1.9	2.5	3.1	3.8	4.4

Darcy の法則を基本とした式により、ろ過層の初期損失水頭を計算することができる。

3.2 損失水頭と負圧の影響

損失水頭は、ろ過層表面付近で大きくなる。ろ過膜直下で負圧が生じると、エアバインディングにより、ろ過が阻害される。

ろ過の継続と共に、原水からもたらされた不純物がろ過層の表面に堆積してくるので、空隙のスペースが減少し、抵抗が増加する。これが起こる時間は、原水から供給される懸濁物質の量、ろ過速度、ろ過層の粒子径（すなわち空隙）に依存する。

一般的には、ろ過膜成熟の初期段階では、損失水頭は清浄なろ過層の初期値からゆっくりと増加するが、ろ過継続期間の後半では、損失水頭は急激に増加する。許容される損失水頭は、通常の設計では1~1.5mで、例外的な条件では最大約2mまで許容されるが、この場合、適切にろ過を継続することは難しい。

原水に含まれる粒子状物質は、ほとんど全て生物ろ過膜や砂層の表面付近に堆積するので、損失水頭は表層でのみ増加する。この現象は、ろ過層内の圧力分布に顕著に表れる。水の動きが無ければ、水圧は深さと共に静的に増加する。しかし、水が流れている条件下では、ある深さの水圧は低くなる。清浄なろ過池では、ろ過層の表面から底部まで、徐々に静水圧は減少し、全体の減少は初期の損失水頭 h_{L0} と等しくなる。ろ過により引き起こされる閉塞により、さらに水圧が下がるが、損失水頭は表面で起きているので、圧力低下の影響はろ過膜の直下のみである。

図 3.3 に示したろ過水流出部の堰は、これによりろ過膜直下の水圧がある最低値以下に低下しないようにするための設備である。堰が無ければ、ろ過の継続と共にろ過膜直下の圧力が負圧になり、ろ過水が排出される時部分的に真空状態を残すことになる。このことは、ろ過池の稼働に重大な影響を及ぼす。藻類の繁殖が進むとろ過池の水が酸素で過飽和となっており、ろ過膜直下の負圧になっているところで、空隙中に微細気泡が発生する。これが、エアバインディング(air binding)である。もし、これがろ過池の一部で起こると通水能力が低下し、他の部分が過負荷になって、ろ過水水質が低下する。エアバインディングがより広範囲に起こると、状況がより悪化し、ろ過速度が大きく低下する。また、発生した微細気泡が集積して大きくなると、その浮力により砂層内を上昇し生物ろ過膜を破って、ろ過池水中に気泡が上がることもある。この場合、部分的ではあるがろ過膜が破壊されて、ろ過水水質が悪くなってしまう。

このため、負圧が発生しないように、水位を制御しながら運転する必要がある。このために最も簡単な方法は、ろ過池の流出水に堰を越えさせ、ろ過水水位が砂層表面より下がらないようにしておくことである。

[設計] ろ過池の流出部に堰を設け、ろ過水水位が砂層表面より下がらないようにする。

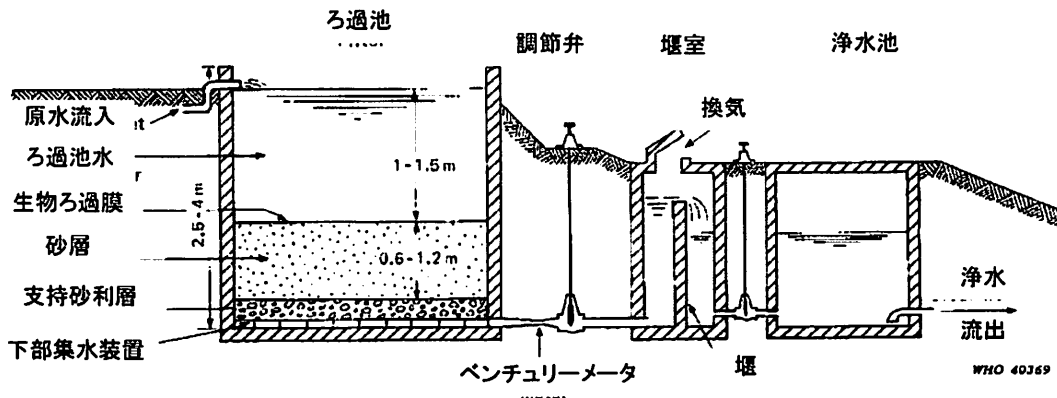


図 3.3 緩速ろ過池(参考資料 1 より)

3.3 壁面短絡流の影響 (Wall effect)

砂ろ過池では、壁面を伝って流れる短絡流が起き、ろ過池水がそのままろ過水に混入することがある。

壁面短絡流の影響範囲は、次式で評価されている。

$$R/D < a \tag{3.10}$$

R : 影響範囲 (cm) D : ろ過砂の径 (cm)

a : 影響範囲の係数 (文献値 25 又は 100)

[ろ過水濁度への影響の推定例]

ろ過池緒元 (m), 面積 (m ²)	5 × 4, 20	20 × 15, 300	50 × 40, 2000	
ろ過池流入濁度 (度)	1	0.041	0.014	0.009
	5	0.205	0.072	0.043
	10	0.410	0.143	0.086
	20	0.820	0.287	0.172

a を 25、ろ過砂の有効径を 0.4 mm とすると、影響範囲は壁面から 1cm 以内となる。この範囲では、短絡流によりろ過池流入水がそのままろ過水に混入すると仮定した。なお、壁面を離れた地点の濁度除去率は 0.995 とした。

緩速ろ過池のろ過面積が小さいと、壁面短絡流の影響が大きくなる。小さいろ過池でも、壁面短絡流の影響を可能な限り少なくするためには、前処理施設によるろ過池流入濁度の低減が効果的であるが、それ以外には、壁面を粗面化することや、勾配をつけてろ過池水が直接ろ過水に混入しない工夫もある。また、砂層が乾燥すると壁面との間に隙間ができる可能性があるため、ろ過池清掃時には出来る限り砂層を乾燥させないようにすることも重要である。

【設計】 ろ過面積が小さいろ過池では、壁面短絡流の影響を抑える工夫が必要である。

【維持管理】 ろ過池清掃時には出来る限り砂層を乾燥させないようにする。



パリ市 Ivry 浄水場

4. ろ過池の運転条件とろ過水水質

緩速ろ過池の運転の目的は、供給する水の高品質を維持することである。同時に、ろ過池の清掃周期を出来る限り長くすることで、経済的で低コストの稼働とする必要もある。一般的には、原水水質、気象条件（特に温度）、ろ過材及びろ過速度の4つの因子がろ過水水質に影響する。

4.1 原水水質と気象条件

原水水質には、有機物、濁度、アンモニア等の緩速ろ過の適正な稼働に影響する水質項目がある。また、水道水の水質基準を遵守する観点から、除去率や浄水処理による付加を考慮して原水水質目標を設定し、前処理プロセスの追加や水質事故対応の参考とする。気象条件で、最も影響が大きいものは水温である。

原水水質には、緩速ろ過の適正な稼働に影響する水質項目と、水道水の水質基準の遵守の観点から注目すべき項目がある。原水水質の目標値を定め、原水の水質がそれを超過する可能性がある場合には前処理プロセスを追加する必要がある。また、水源の水質事故等異常時には、原水水質目標値を参考にして、対応策を実施する。

緩速ろ過の適正な稼働に影響する水質項目には、好気的な生物ろ過膜の維持に影響する可能性のあるBOD、アンモニア態窒素、過マンガン酸カリウム消費量又は全有機炭素(TOC)がある。また、ろ過閉塞の原因となるうるものとして、藻類（主に珪藻類）と濁度がある。

水質基準の遵守のためには、緩速ろ過で除去可能なものについては除去率を考慮して原水の水質目標値を設定する。この場合、原水水質目標値は水質基準値より高く設定することができる。緩速ろ過で除去不可能のものについては、原水水質目標値と水質基準値は同じ値で設定する。除去の可能性はあるが除去率が不明確なものについても、安全のため、原水水質目標値と水質基準値は同じ値で設定する。また、消毒剤の成分など浄水処理過程で付加されるものについては、原水水質目標値は付加量を考慮して、水質基準値より低く設定する必要がある。

$$\text{原水水質目標値} = \text{水質基準値} / (1 - \text{除去率}) + \text{付加量} \quad (4.1)$$

さらに、塩素消毒などによる消毒副生成物の原料物質は、生成物の水質基準を想定して設定する。この場合、例えばTOCや色度など代替指標を用いてもよい。

気象条件で最も影響が大きいものは原水水温である。生物ろ過膜やろ過層のズーグレアの成熟期間、粒子除去、有機物の分解、硝化などの生物反応の速度、ろ過層の損失水頭など、緩速ろ過の浄化機能や運転状態に影響を与える。また、気温低下は、緩速ろ過池からの熱損失に影響し、冬季、ろ過池の凍結を引き起こすことがある。これは落水時の生物ろ過膜の削り取り作業に大きな影響を与えるので、状況によっては覆蓋が必要となる。風

は、緩速ろ過池の水深が浅い場合、生物ろ過膜を攪乱することがある。また、一定方向の風が継続する場合は、緩速ろ過池水で繁殖する植物プランクトンや浮上したろ過膜藻類を緩速ろ過池の一部に集積させ、そこでの再沈降による部分的な有機物負荷の増大を引き起こすことがある。この場合、越流管からそれらを効率よく排出する必要がある。

○ 原水水質目標値の例

(それぞれの緩速ろ過池の運転条件とそれによる除去率等によって異なる。)

項目		影響	単位	水道水 水質基準値	原水 水質目標値	
運転管理に 影響	BOD	溶存酸素の低下、 好気性細菌や動物 の機能低下	mg/l	-	3	
	アンモニア態窒素	塩素消費、溶存酸 素の低下、好気性 細菌や動物の機能 低下	mg/l	-	0.5	
	過マンガン酸カリウ ム消費量(TOC)	溶存酸素の低下、 好気性細菌や動物 の機能低下	mg/l	- (3)	10 (3)	
	濁度	ろ過閉塞	細胞/ml	2(0.1)	10	
	藻類数(珪藻類)	ろ過閉塞	細胞/ml	-	300	
水質基準の 遵守に影 響	除去可 能	濁度	ろ過水濁度の上昇	度	2(0.1)	10
		色度	水質基準の超過、 消毒副生成物の代 替指標	度	5	10
		一般細菌	病原微生物	個/ml	100	5000
		大腸菌群 (大腸菌)	病原微生物	MPN /100ml	- (検出しないこと)	5000 (500)
		溶存マンガン	着色	mg/l	0.05	0.1
		溶存鉄	着色	mg/l	0.3	1
		フェノール類	着臭	mg/l	0.005	0.01
		陰イオン界面活性剤	泡立ち	mg/l	0.2	0.5
		ジエオスミン	着臭	mg/l	0.00001	0.00002
		2-メチルイソボルネオール	着臭	mg/l	0.00001	0.00002
除去不可能のもの、除去率 が不明確のもの		アルカリ金属、陰イオン類、揮発性有機化学物質等				
処理過程で付加される可能性 のあるもの		消毒副生成物、消毒剤成分(ナトリウム、塩化物イオン)等				

原水水質目標値は、参考資料5を参考にした。

濁度の水質基準値は2度であるが、クリプトスポリジウム対策で0.1度以下が求められている。

4.2 ろ過砂の粒径とろ過速度

ろ過砂の粒径が細かいほど、良質なろ過水が得られるが、ろ過継続日数が短くなる。安全範囲を確保するなら、ろ過砂を細かくするよりろ過層を厚くした方がよい。ろ過速度が低いと、生物的な浄化効果が高くなるが、溶存酸素の低下や、極端な場合副生成物がろ過水に混入するようになる。ろ過速度が余り大きくなると破過も起こりうる。

一般に、細かいろ過材はろ過水水質がより良くなる傾向がある。「遮り」は空隙が少ないほどより効果的に起こり、「付着」も全表面積が大きくなるほど改善される。同時に生息場所が増えると有機物を生化学的に分解する微生物が増え、ろ過層内の細菌類に利用できる栄養濃度を減少させ、その結果ろ過水水質を改善する。砂粒子の結合表面積が大きいと、原水中に含まれる成分との接触がより密になり、化学的な反応が（表面の触媒作用）促進される。表面積は砂層深さが増すと増加するが、直径 0.15mm の粒子で砂層深さ 0.6m の全表面積は、直径 0.35mm の粒子で砂層深さ 1.4m の全表面積に相当するので、細かい砂の選択の方がより経済的である。

「遮り」の効率はろ過速度に依存しない。一方「沈殿」は、粒子の一部分 4~20 μ m の範囲の粒子を除去するのみであるが、ろ過速度が大きくなるに伴い沈殿効率が下がる。「付着」に寄与する力は、僅かながらろ過速度に影響を受ける。ろ過速度が大きくなると、濁質は砂層内部に侵入し易くなり、砂層深さにもよるが場合によっては、濁質が破過(break through)し、ろ過水中に混入するようになる。

一方、生物的な活性は時間依存性が大きく（特に低水温では）、ろ過速度が大きくなると、水と浄化に寄与する微生物との接触時間が短くなる影響を受ける。これらの微生物は、通常ろ過層の 30~40cm 上部にのみ存在するので、ろ過速度が大きくなると、細菌類への餌の供給がより深いところまで達する。このような状況下で、細菌類はより深い地点まで生育するようになるが、濁質と同様に、有機物の除去にもある程度の限界はある。

非覆蓋で豊富な藻類繁殖のあるろ過池では、ろ過速度が低いと有機物の分解による溶存酸素濃度の低下の影響が顕著になり、特に夜間の好気的狀態の維持が難しくなる。さらに、数 cm/hr 程度の低ろ過速度では、藻類の代謝の副生成物質がろ過水に混入するようになり、ろ過水に異臭味の障害が発生することも起こりうる。

ろ過水水質は、ある限界範囲内ではろ過速度には依存しない。アムステルダムの水道では、3つの覆蓋緩速ろ過池を異なるろ過速度 0.1、0.25、0.45m/hr で1年以上運転したところ、ろ過水水質に明確な違いは見られなかった。一方、Rechenberg は、ろ過速度 U で運転する緩速ろ過池で、流入水及びろ過水の過マンガン酸カリウム消費量 c_i と c_e には次のような関係があるとしている。

$$c_e/c_i = 0.8U^{1/6}$$

ろ過速度を倍にすると、ろ過水の過マンガン酸カリウム消費量は 12%増加し、僅かではあ

るが明確な違いがあるという例である。

ろ過速度が大きく細かいろ過砂では、損失水頭の上昇により、ろ過継続時間が短くなる。ろ過他の清掃を人力で行う場合、ろ過継続時間が短いと（例えば藻類の繁殖時）、清掃労働力に大きな負荷をかけ、配水の供給の継続を危うくし、清掃直後はろ過効率が低下するのでろ過水水質を悪くする。このため、ろ過池は、原水が最も悪化する状態において、ろ過継続日数が 2 週間以下に落ちないように設計し、運転しなければならない。平均的な運転条件では、清掃の間の運転日数は数ヶ月と期待できる。

ろ過継続日数を推定する良い方法は、実際の原水を異なる粒径のろ過砂を用いて処理する室内実験や（より望ましいものとして）パイロット実験がある。まず、ろ過砂は、要求ろ過水水質を満たすのに十分な細かさ確保するようにして、その上でろ過速度を決定すべきである。ろ過速度は、最悪の条件で少なくとも 2 週間のろ過継続日数を確保する程度に小さくする必要がある。

ろ過砂を必要以上に細かくすると、ろ過継続日数が極端に短くなる。もし、ろ過水水質を考慮し一定の安全性を見込む必要があるなら、ろ過砂を細かくするよりろ過層を厚くした方がよい。しかし、この基準によれば、非常に清澄な原水の場合、粗い砂でよいということになる。その場合、原水に含まれる物質は砂層深く入り込むので、表面を削り取る清掃は効果的ではなくなる。このような場合には、細かい砂を使うことは必要性というより保証という意味になる。

4.3 前処理および塩素処理の効果

前処理(沈澱、急速ろ過、マイクロストレーナー、オゾン)は、緩速ろ過への負荷低減効果がある。塩素処理は、安全策として有効である。

濁水は、ろ過継続日数をある程度の長さに保とうとすると、非常に低いろ過速度にする必要があるため、この濁度を低減化するための前処理を考えなければならなくなる。このコストと運転は、国により異なるが、一般には、(例えば沈澱やろ過などの)前処理施設を設置することは、0.1m/hr のろ過速度を約 20%、0.2m/hr を約 60%増加させることができれば、経済的には魅力である。

沈澱池などによる原水の貯留は、原水水質が大きく頻繁に変動する場合にも有効である。短期間の原水水質変動は、ろ過継続日数に大きな影響を与えるほど重大ではないが、短期間にろ過水の水質を悪くすることがある。エアレーションは、他のプロセスとの併用であっても、原水の酸素要求量が溶存酸素量を超える場合には特に必要である。この状況が改善されなければ、生物ろ過膜が嫌気的狀態となることによる障害が確実に起こる。

普通沈澱あるいは粗ろ過は、普通に使用される前処理方法であるが、他の前処理プロセスでも原水水質条件によっては、より適したより効率的なものになりうる。例えば、濁度は貯留と沈澱で減少するが、沈澱は化学凝集 (chemical coagulation) と組み合わせるとよ

り効率的になる。ただし、凝集剤を注入したあと、フロックを含む水あるいは沈澱後の上澄水であっても微量の未凝集成分が含まれている場合には、生物ろ過膜表面に凝集剤のフロックが集積し著しいろ過閉塞が起こりうる。

マイクロストレーナーは、貯水池からの原水の場合、高濃度の植物プランクトンを減らすのに有効である。取水部分のスクリーン、自然あるいは人口の砂を充填した井戸、地下浸透などは、懸濁有機物を除くのに費用のかからない有用な方法で、設置に適していれば実用的である。

緩速ろ過池内で病原微生物や他の動物起源の有機物質を分解する微生物は、植物起源の同様な物質を処理する機能が弱い。これらは全く除去に有効ではないということではないが、泥炭のように特に安定な有機物の場合は、色度のある部分は除去することはできない。例えば、経済的に稼働させることを優先に考える必要のある熱帯の小規模施設では、このことは許容される。より工業化した先進国では、需要者が感覚的な水質への要求が高く、さらに塩素消毒の副生成物に対する水質規制も考慮すると追加的な処理が必要となる。この場合の前処理としては、凝集処理やオゾン処理が考えられる。

また、農薬等の微量有機化学物質への対応として、オゾン酸化-粒状活性炭ろ過、粒状活性炭ろ過なども有効である。

塩素処理は、細菌類やウイルスなど病原微生物を不活性化し、残留塩素により消毒効果を維持するという点で有効な手段である。前処理がなく、ろ過が処理の最終段階である場合、注入率は比較的少なく（普通 0.5mg/L でまれに 1.0mg/L を超える）抑えることができる。緩速ろ過により病原微生物が除去できたとしても、塩素消毒は水道水の安全確保のための防御となる。

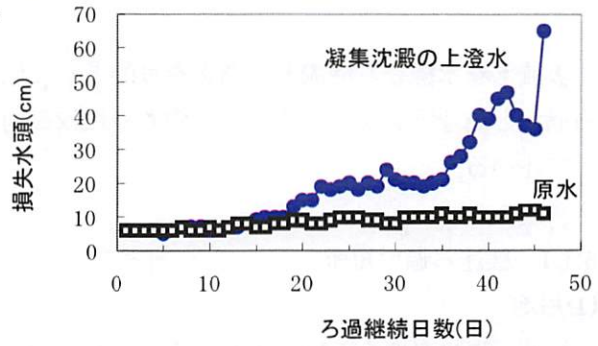
○ 前処理施設の例

対象物質	前処理施設
濁度	普通沈澱池 凝集剤注入（高濁度時のみ）－普通沈澱池 粗ろ過 凝集沈澱池 凝集沈澱－急速ろ過 河岸浸透ろ過
植物プランクトン（原水）	マイクロストレーナー
植物プランクトン（ろ過池水）	結合塩素消毒
溶存酸素 BOD アンモニア態窒素 TOC 微量有機化学物質	エアレーション 凝集沈澱池 前塩素注入 オゾン酸化 オゾン酸化－粒状活性炭ろ過、粒状活性炭ろ過
カルシウム	硬度低減化（ソフトニング）
水質変動緩和	原水貯水池
水質事故対応（油臭等）	粉末活性炭注入（一時的）

—凝集沈澱の上澄水を緩速ろ過池に流入させた場合の損失水頭の上昇—

—名古屋市の事例（参考資料 7 より）—

凝集沈澱の上澄水は、濁度が低くても損失水頭を上昇させ易い。



原水濁度 平均 3.0 度
 凝集沈澱上澄水濁度 平均 1.0 度
 ろ過速度 1.25-2.08 m/hr



アムステルダム市 Leiduin 浄水場

5. 緩速ろ過の短所と長所

表流水を水源とし除濁及び消毒を目的として使われる浄水処理方法としては、主に緩速ろ過法と急速ろ過法があるので、両者の比較を前提として、緩速ろ過法の短所と長所について述べる。

5.1.1 緩速ろ過の短所

(1)用地

緩速ろ過は必要な面積がより大きくなり、土地が制限されるあるいは高価な場合、資本コストが高くなる。

緩速ろ過の場合、前処理施設の有無により面積が異なる。緩速ろ過池で最適な浄化機能が得られる濁度は10度以下で、対応できる最大濁度は、数日では100～200度、長期的には50度である。この濁度を超えるような場合には、次のような前処理施設が必要となる。

- ・普通沈澱池（濁度20～100度まで対応可）
- ・藻類除去のためのマイクロストレーナーを設置した原水貯留池で、滞留時間が数週間から数か月になるもの（濁度として数度まで対応可）
- ・河岸ろ過（河床の閉塞の程度によるが濁度10～20度まで対応可）
- ・粗ろ過（濁度20～50まで対応可）
- ・凝集（必要な場合）沈澱と粗ろ過又は一次ろ過（濁度50～200まで対応可）

（）内の濁度範囲は、それぞれの一般的なプロセスの対応限界を示しており、原水の懸濁物の粒度分布や生物ろ過膜に蓄積していく総量に影響される。

浄水場に必要面積の例として、濁質を含む河川水を原水とし、日量13.7万m³を処理する浄水場では、例えば、次のような面積となる。

- 急速ろ過法：上向流式沈澱槽、凝集剤注入設備などを含めて・3,000m²
- 緩速ろ過法：30,000m²と次のような前処理施設のための用地が必要である。

普通沈澱池・10,000 m²

原水貯留池・滞留時間によるが1,000,000m²まで

粗ろ過・1,000m²

凝集沈澱・3,000m²

(2)建設資材費

鋼材等の輸入や鋳鉄管の布設に問題がない国では、鉄筋コンクリートや金属継手が必要な急速ろ過の方が、簡単な非鉄筋コンクリートでもよい緩速ろ過より安く建設できる可能性もある。例えば、オランダでは、緩速ろ過の初期投資は急速ろ過のほぼ3倍になるが、この数字には、ろ過池の完全覆蓋や機械式ろ過膜洗浄設備も含んでいる。

(3)労働力の調達

緩速ろ過では、ろ過池清掃のための未熟練労働者が多く必要で、その労働力を保持する

より、急速ろ過の維持管理のための少数の熟練要員を募集した方が、特に自動制御装置が導入されている場合簡単で安いこともある。しかし、最近、緩速ろ過の機械式清掃が発達してきているので、この条件は以前より重要でなくなっている。

(4)冬季低水温対策

冬季の凍結防止と浄化効率改善のために、覆蓋のための構造物が必要となる。急速ろ過も同様に影響されるが、ろ過池の面積が小さいため必要な費用は少ない。

(5)原水水質

原水水質がかなり悪く生物ろ過膜の好気性が保てない、水質の急変が起こり易い、あるいは毒性のある工場排水やコロイド物質の濃度が高いようなところでは、生物ろ過の機能が悪くなり、緩速ろ過に適さない。

(6)ろ過膜藻類

ろ過膜藻類は、種類によってはろ過池の機能の障害となる。通常、ろ過閉塞が早くなり、ろ過池清掃が頻繁になる。そのような場合には、遮光のためにろ過池を覆蓋するための追加の建設費用が必要となる。ただし、障害を起こさない種類の場合には、日射のある昼間にろ過池水の酸素濃度を上昇させ、ろ過水の改善やろ過効率の改善につながることもある。

上述の6つの条件のうち、(1)～(5)は、特に北部気候帯の先進国に関係し、生物ろ過の利点が短所に勝っている場合、先進国では、大規模な緩速ろ過の導入がみられる。また、これらの短所がそれほど大きくない国では、特に小規模施設において、緩速ろ過が最も簡単で効果的な表流水処理方法となっている。

5.1.2 緩速ろ過の長所

(1)良好なろ過水の水質

通常の表流水の原水に対し、緩速ろ過の生物ろ過で達成できるような物理的、化学的、微生物学的な水質改善効果は、他の単一処理プロセスでは達成できない。ろ過水中の有機物濃度も低減化でき、配水系統内の細菌の再増殖を抑制できる。また、かび臭など異臭物質も除去することができる。

(2)建設コストと簡易な設備

緩速ろ過池は、その地で調達できる材料や技術でも建設可能で、機械化設備を最小限にし、設計は簡単にすることができる。また、特殊な配管や設備も必要ないので、計装設備もかなり省略できる。また、ろ過材や建設材料にも大きな自由度が許されている。

ただし、用地費用が高く低水温対策の覆蓋施設が必要な場合は、資本的なコストが必要となり、急速ろ過と同じ又はそれ以上となる。

(3)低コストで容易な維持管理

緩速ろ過の維持管理コストは、人力でも機械によるものでも、ほとんどがろ過膜の清掃によるものである。労働力が容易に得られる発展途上国などでは、人力による清掃が行わ

れ、維持管理コストの全ては人件費となる。

輸入薬品などの薬品はこのプロセスに必要ないが、多くの場合、安全のため塩素処理が追加されている。この場合、塩素処理は、急速ろ過法より塩素注入率が低くなるのが一般的である。また、急速ろ過のように逆洗のための圧縮空気、機械攪拌、高圧水が必要ないので、そのための付帯設備も必要なく、燃料や電気のコストも少ない。

さらに、緩速ろ過の運転管理者は、急速ろ過に比べて、訓練も技術も少なくても良い。また、彼らの監督やサポート（例えば、試験室での水質試験）も少なくても良い。原水水質、温度、気象条件の一定範囲内の変動であれば、そのまま許容でき、短期間であれば高濁度でも処理停止せずに対応できるからである。

(4)節水

水資源が貴重な地域では、緩速ろ過は、逆洗水を恒常的に排出する必要がないという利点がある。圧力式あるいは重力式急速ろ過の場合、数日おきに洗浄が必要となり、この水量が全処理水の2-3%になる。場所によっては洗浄水の再利用が行われており、この場合にはそのための設備のコストが必要となる。

清掃直後で生物学的機能が回復していない（成熟期間に）ろ過層を通過する水は、原水に付加される不純物はないので、原水に戻すか他のろ過池に流入させることで、用水の有効活用ができる。

(5)汚泥の廃棄

緩速ろ過の汚泥の貯留、脱水、廃棄は、凝集剤を含む急速ろ過に比べると、問題は少ない。緩速ろ過の汚泥は乾燥状態で処理されるので、基本的には、周辺水域の汚染の可能性はない。廃棄物は、土地改良材として農業で使われる。砂と有機物を含んだものは、粘土土壌の改質・調整に特に適している。

II 緩速ろ過の設計

(1) ろ過面積及び池数

事項	水道施設設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連カ所
ろ過面積 (m ² /池)	50～5,000	100～5,000	-	(av. 997.5)	I - 3.3
	<p>ろ過池面積の下限について、ろ過層の縁は、ろ過水水質の点から最も弱い部分であり、設計と運転が適切でなければ、壁面短絡流により原水がそのまま砂層を通過してしまうことがある。ろ過水全体への影響を抑えるためには、ろ過池をあまり小さくしないようにする必要がある。</p> <p>ろ過池面積が大きければ大きいほど、単位面積当たりのイニシャルコストは低くなる。地質や気象条件にもよるが、一定以上の面積を超えると、地盤沈下、地下水位による底面の持ち上げ、温度ストレスによりクラックなど、止水構造に影響するリスクが増える。また、ろ過膜の成熟期間の部分的なずれが生ずる可能性もある。</p>				
予備池数 (池/浄水場)	10 池迄ごとに 1 池	1 池以上 (大規模施設では 2 池以上)	1 以上	全池数の 15%	-
	<p>ろ過池の清掃には最低でも 1～2 日間、加えて生物ろ過膜成熟までのろ過放水期間に残りのろ過池が過負荷にならないようにする必要がある。また連続的に各池でろ過閉塞が起こり、ろ過停止やろ過速度の低下が必要になることを考えると、少なくとも 1 池を予備池として確保する必要がある。</p>				
ろ過池数 (池/浄水場)	2 以上	2 以上	2 以上	-	-
	<p>ろ過池数 n は全ろ過面積を個々のろ過面積で割ったものに予備池数を加えたものになる。このため、どのような小さな浄水場でも最低 2 つの池が必要である。全ろ過面積 A (m²) は、必要な処理水量 Q (m³/日)、表面負荷 HLR (ろ過速度、m/日) から、$A = Q/HLR$ で計算される。</p> <p>ろ過池数が多いほど池の運用に融通性があり、面積が小さいほど清掃が容易で、労働力が削減できる。</p> <p>これらを考慮すると、池数を求める近似式は以下のようになる。</p> $n = 1/4\sqrt{(Q/24)}$ <p>ここで、n は 2 以下にしない。</p>				
配置	<p>ろ過池の配置は、原水の流入や配管類の配置、ろ過池構造物の建設費用、将来の拡張を考慮して定める。</p> <p>また、ろ過池の清掃が容易にできるよう、特に多量の藻類の除去が可能となるように、ろ過池にアクセスし易い配置とする。ただし、ろ過池を覆蓋する場合は、藻類が極めて少なくなるので、1 回の清掃で除去する物質量は少なくなる。この場合、清掃のためのアクセスは少なくて済み、ろ過池は近接してよい。</p>				

II 緩速ろ過の設計

(2) ろ過池の形状と構造

事項	水道施設設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連カ所
形状	長方形	長方形	-	-	-
	<p>清掃の容易さを考慮して形状を定める。特に、機械による削り取りの場合は長方形がよい。極めて小規模な施設で円形のろ過池（鋼製のタンクに入れたもの）が使われる以外は、通常は同じ面積の長方形のものが作られている。</p>				
ろ過池 砂面上 水位(m)	90~120cm	100~150 cm	Max 200~300cm	-	I-3.1
	<p>原水の貯水部は、砂層表面から上方に壁を延長する形で作られる。この目的は、原水を数時間滞留させ、その間に粒子の沈殿、凝集、酸化が起こるようにすることと、ろ過層の抵抗に勝る水位差を確保することである。</p> <p>後者の目的により、貯水部の大きさが決まる。ろ過抵抗（損失水頭）Hは、ろ過池の清掃後の H_0 からろ過継続の最終 H_{max} まで変化するので、貯水部の水位は、理論的にはこの範囲内で変化すればよい。実際には、流出管に調節弁を付けて、H_{max} 以上の水位で一定に保つのがよい。一定水位に保つことで、生物ろ過膜の攪乱の抑制や越流管から貯水部に浮遊する不純物の排出に加えて、ろ過層表面に到達する太陽光を少なくして水生植物の繁茂の抑制する効果がある。</p>				
池水位から の壁面 余裕高 (cm)	最大水位から 30cm	最大水位から 20~30 cm	最大水位から 10~30 cm	-	-
	<p>水位制御の余裕、風などによる越流を防ぐために、貯水部の水位からの壁面の余裕高を確保する必要がある。</p>				
ろ過池の 設置深さ	<p>ろ過池は水密構造にして、ろ過水の漏出防止とろ過水の汚染の原因となる地下水の侵入防止を図る。このために、ろ過池の底面を地下水水位より高い位置にするとよい。また、ろ過池を地中に設置することには、断熱効果とアクセスの容易さという利点がある。</p> <p>低水温の問題が無いような気候の地域、地下水水位が高く、硬い岩盤の掘削が難しくコスト高のところでは、小さいろ過池を地上に建設する場合もある。</p>				
地盤から の壁面余 裕高(cm)	地盤から 15cm 以上	-	-	-	-
	<p>風により運ばれるほこりや汚染物のトラップ、小動物のろ過池への落下防止など、周辺からの汚染物混入防止のために、地盤より壁面を高くする。</p>				
斜壁と垂 直壁	<p>斜壁は、地面を十分活用することにより構造的なストレスを減らすことができるが、広い土地が必要、壁面に植物が繁殖し易い、止水が難しいなどの問題点がある。また、壁面でろ過砂が密になりやすいので、壁面短絡流の問題はない。</p> <p>垂直壁の壁面短絡流対策は、ろ過層と接する内壁面に、僅かな勾配を付ける、溝を入れ込む、表面を粗くするなどの方法がある。かつて、使われていた方法として、下部集水装置を壁の基礎から一定の距離をとって設置することであるが、この方法は、有効ろ過面積を減らすので、今日ではほとんど使われていない。(図 II.1)</p>				

II 緩速ろ過の設計

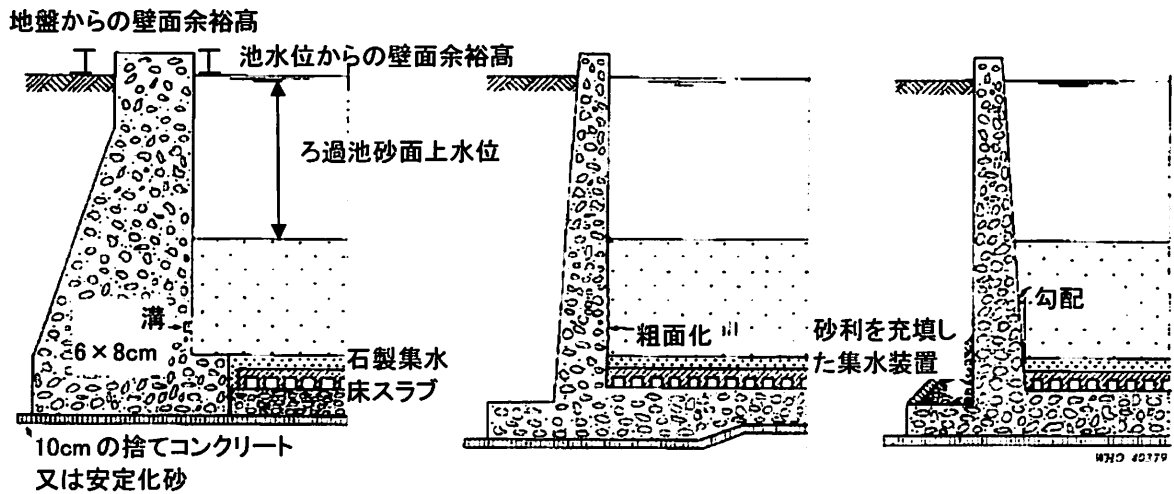


図 II.1 垂直壁の壁面短絡流対策 (参考資料1より)

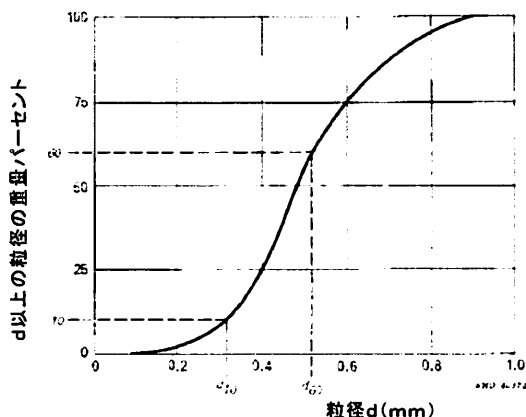
(3) ろ過砂及びび砂ろ過層

事項	水道施設設計指針 (参考資料3)	WHO (参考資料1)	AWWA (参考資料2)	日水協アンケート60事業体 (参考資料10)	基本整理 関連カ所
有効径 (mm) d_{10}	0.3~0.45	0.15~0.35	0.2~0.3	-	I-3.1 I-4.2
	<p>ろ過砂の粒度分布を測定し、粒径の小さなものから積算し10%に相当する粒径を有効径という。(図II.2)</p> <p>有効径が小さい方が、生物膜が成熟し易くよいろ過水水質を得られることと、原水中の粒子が削り取り厚さより深く砂層内に侵入することを防ぐという利点がある。細菌の除去率も良い。一方で、損失水頭が上昇し易くなるという問題がある。</p> <p>実際には、上記の範囲に入らないものも使用されているので、最終的には、その場所で調達できるものということになる。</p> <p>2種類以上の砂を混合することで理想の粒径にすることもできるが、混合は完全にする必要があり、コンクリートミキサー等を使用する方法もある。</p>				
均等係数 d_{60}/d_{10}	2.0以下	1.5~2.0	1.5~2.0	-	I-3.1
	<p>60%径と10%径の比を均等係数という。(図II.2)</p> <p>空隙の大きさを一定にし、十分な空隙率を確保するために、ある程度の均一性が求められる。均等係数は3以下とすべきで、2以下が望ましいが空隙率や透過率からいえばそれほど改善しない。1.5以下となると粒度調整のためのコストが高くなる。</p>				

II 緩速ろ過の設計

<p>その他の要件</p>	<p>ろ過材は堅く、耐久性があり、できれば球形で、粘土や有機物を含まないものが望ましい。必要であれば砂を洗浄して、微細粒子を除去し、均等係数を下げて平均粒子径を上げる必要がある。炭酸ガスを多く含む原水の浸食作用による空洞形成を防ぐために、カルシウムやマグネシウムは炭酸塩として2%以下の必要がある。</p> <p>[参考 日本水道協会規格「水道用濾材」JWWA A 103] 最小径-最大径：0.18~2.0mm, 洗浄濁度：30度以下, 密度：2.57~2.67 強減減量：0.75%以下, 磨減率：3.0%以下, 塩酸可溶率：3.5%以下 浸出性：味（異常でないこと）、臭気（異常でないこと）、色度（0.5度以下）、濁度（0.2度以下）、鉄（0.03mg/L以下）、マンガン（0.005mg/L以下） （洗浄濁度は、ろ過池稼働開始時のろ過水濁度に影響するので重要である。浸出性は、水道施設の技術的基準に適合するように設定されている。）</p>				
<p>ろ過砂厚さ (cm)</p>	70~90	120~140	100~150	-	I-1.4 I-2.4 I-3.1
	<p>ろ過砂の厚さは、浄化機能、補砂間隔、損失水頭を考慮して定める。浄化機能について、生物ろ過膜直下には浄化に寄与する細菌類が生息するゾーンがあり、通常その厚さは30cmから40cmである。この厚さは、ろ過砂粒子が粗いほどろ過速度が高いほど厚くなる。次に、細菌類により放出された有機物が化学的に分解されるゾーンで、この厚さは40cmから50cmになる。さらに、硝化などの反応が起こる無機物酸化ゾーンが続く。これらのゾーンの厚さは、原水に含まれる有機物濃度や生物ろ過膜に蓄積された有機物量により異なり、これらが多いほど厚く、少ないほど薄くなる。また、ろ過砂の層は、生物ろ過膜による粒子除去の補完的な役割を果たすことも考慮する必要がある。</p> <p>ろ過池の清掃では、通常表面の1~2cmを削り取り、再び充水して使用される。これを繰り返して、ろ過池を使用していくと、新しい砂を補充（補砂）し、ろ過層の厚さを元に戻す必要が生ずる。このため、初期の砂層厚さは、補砂までの期間、削り取りが連続して出来るようにしておく必要がある。</p> <p>補砂間隔 Y (年) は、初期のろ過砂厚さ D_i (cm)、補砂前のろ過砂厚さ D_f (cm)、1回の削り取り厚さ R (cm)、年間削り取り回数 f から、$Y = (D_i - D_f) / R \cdot f$ で計算される。</p> <p>また、ろ過砂の厚さは、初期の損失水頭に影響し厚いほど損失水頭が大きくなるが、砂の粒径の選択により、この影響は余り重要ではなくなる。</p>				
<p>補砂前砂層厚さ (cm)</p>	40	50~70	50	-	-
	<p>ろ過層の浄化機能を維持できる最低限の砂層厚さを確保する。</p>				

図 II.2 ろ過砂の篩分け
(参考資料 1 より)



II 緩速ろ過の設計

(4) 下部集水装置と砂利層

事項	水道施設設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連カ所
構造	<p>下部集水装置の目的は、ろ過材の支持と、ろ過水を滞留させずにろ過池下部から流出させることである。下部集水装置は、ろ過砂が入り込んで閉塞しないように設計・施工し、ろ過砂を敷き詰める際に乱されないようにすることで、ろ過水が均等に流れて、ろ過池のどの部分でも均等に浄化作用が機能するようにしなければならない。</p> <p>集水装置内の水の流れは、摩擦、乱流、静水圧から動水圧への変換による損失水頭を伴う。このため、ろ過水の水頭は、水平面内である程度異なるものになるので、これによるろ過速度の変動を完全に抑制することはできない。しかし、設計を工夫して、ろ過層内の下降流の全体の損失水頭に対して、ろ過水水頭の水平的な差を小さくすることができる。下部集水装置の損失が、砂が清浄でろ過層が補砂前の最小厚さになった状態のろ過層全体の損失水頭に対し、その 10%を超えないようにすれば、ろ過池の水平方向内での変動は許容範囲に収まる。(図 II. 3)</p> <p>[水道施設設計指針の集水構造の記載] 支集水渠流速 15cm/s 以下、主集水渠流速 20cm/s 以下、支集水渠間の水平距離 4m 以内、主集水渠勾配 1/200 程度、支集水渠勾配 1/150</p>				
集水装置の構成材料	<p>小さい緩速ろ過池の主集水装置は管、大きいろ過池の場合はコンクリート製で、ろ過池の底面に凹部を作るものである。支集水渠は、多孔質コンクリート・有孔ブロックで、簡単な装置の場合は、多孔質又は有孔の素焼きのタイル、開き継手を付けた管、有孔塩化ビニル管などが使われる。(図 II. 4)</p>				
砂利層の粒度	<p>粒径：最小 3 mm～最大 60 mm 4 層</p>	<p>*</p>	<p>WHO と同じ</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>下部集水装置とろ過層の間には、数層の砂利層を入れ、ろ過材が集水装置に入り込み閉塞を起こすのを防ぎ、限られた数の集水渠でもろ過水の流れが均等になるようにする。</p> <p>*WHO 支持砂利層は、表面が細かく底部を粗くし、各層は正確に粒度調整する(10%及び90%通過径の比が$\sqrt{2}$以内であること)必要がある。最下部の砂利層の粒度は、有効径が集水装置の開口部(ブロックの隙間や開き継手の隙間)の大きさの2倍以上で、続く各層は、上の層の有効径がその下の層の有効径の4分の1以下とならないようにする。最上部の砂利層は、ろ過砂のd_{15}より4倍以上大きくd_{85}の4倍よりは小さい有効径を選ぶ必要がある。</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-left: 20px;"> <p>上層(有効径:ろ過砂のd_{15}より4倍以上、d_{85}の4倍より小さい)</p> <p>中間層(有効径:下の層の有効径の1/4以下とならない)</p> <p>下層(有効径:集水装置開口部の2倍以上)</p> <p>各層(d_{90}/d_{10}が$\sqrt{2}$以内)</p> </div> </div>					

II 緩速ろ過の設計

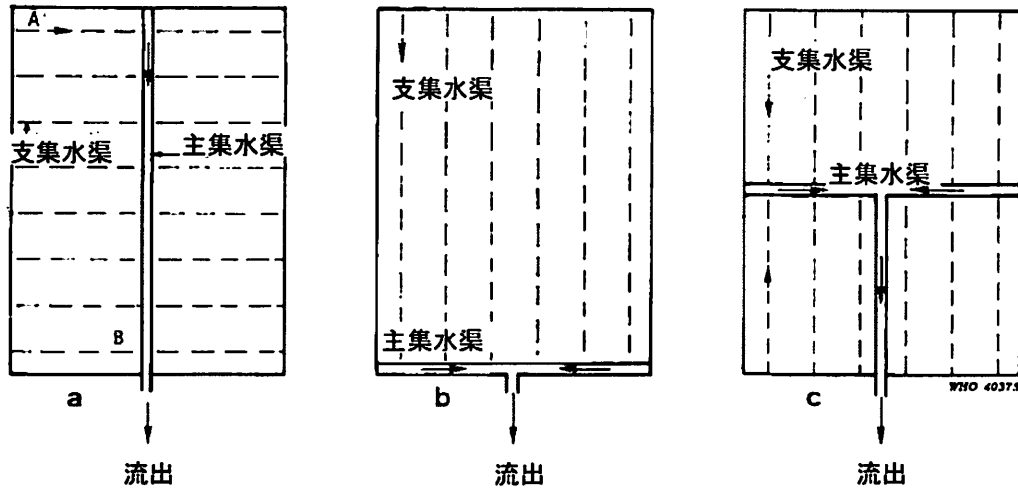


図 II.3 下部集水装置の主集水渠と支集水渠の配置 (参考資料 1 より)

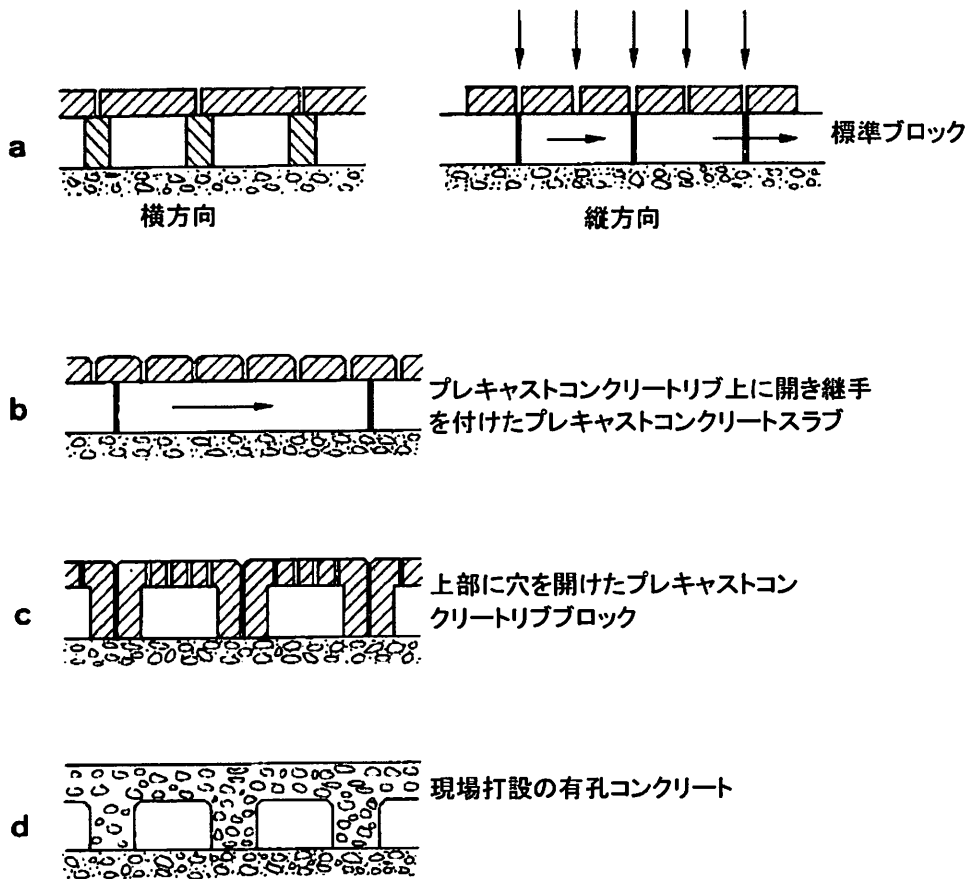


図 II.4 種々の集水渠の配置 (参考資料 1 より)

II 緩速ろ過の設計

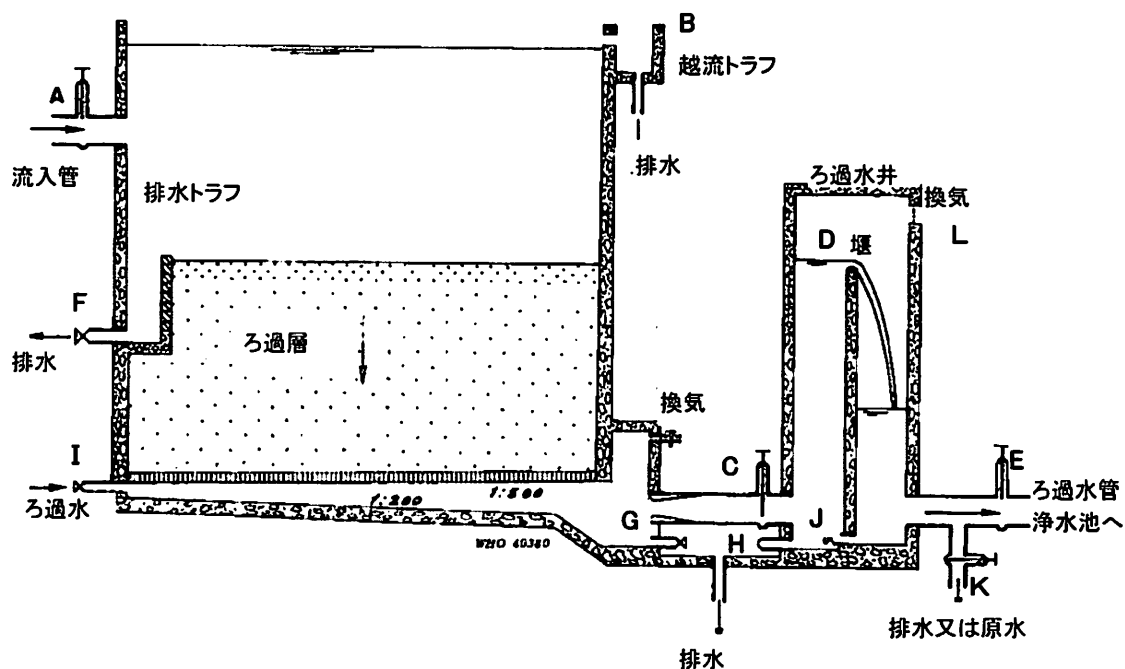
(5) 調節装置

事項	水道施設設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	-
調節装置	<p>緩速ろ過池を適切に稼働させるためには、運転を制御するための管、バルブ、装置等がろ過池ごとに必要である。ろ過池の基本的な操作は、次の通りになる。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①ろ過池へ原水を導入する ②生物ろ過膜が形成され浄化機能が発現するまで、ろ過水を放水する（原水として再使用する） ③浄化機能が発現を確認した後、ろ過水を浄水池に送る ④徐々にろ過速度を上げる ⑤ろ過継続の間、損失水頭に合わせてろ過速度を調整する ⑥ろ過池のスカムや浮遊物がある場合、それらを除去する ⑦損失水頭の上昇などによりろ過を停止するため、原水の流入を停止する ⑧清掃前に、ろ過池の水を排水する ⑨ろ過層内の水位を下げる ⑩清掃後、ろ過層に下から（他の池の）ろ過水を満たす <p>ろ過継続中は、ろ過速度を安定的に保つことと、ろ過層内に負圧を生じさせないことが重要である。このため、ろ過池の水位を一定に保ち、損失水頭（ろ過抵抗）の増加に応じて流出水水位を調整してろ過速度を制御することが通常行われている。流出の制御をしない場合、ろ過池の水位変動によりろ過速度が大きく変化し、ろ過水水質に影響することがある。</p> <p style="text-align: center;">基本整理関連カ所（I-1.4）（I-3.2）（I-4.2）</p>				
流入設備	<p>ろ過池の流入量及びろ過池の水位は、フロートコントロールのバタフライ弁、あるいは流入管の仕切弁（図Ⅱ.5のA）で制御する。ろ過池ごとに個別のポンプで原水を供給する場合は、ポンプ出力を調整する。</p> <p>流入速度が大きいと流入部付近のろ過膜が攪乱されるおそれがあるので、できるだけ緩やかに流入させる。流入速度は平均50cm/sec程度とする。</p> <p>流入部は、その直下のろ過層を攪乱しないようにする。流入部付近にコンクリート板、レンガを敷く、流入部に半円形越流堰を設け流入管を下向きに設置する方法、半円形整流壁を設ける方法、流入側側壁を越流堰として流入させる方法、ろ過池水の排水トラフを流入部直下に設置する方法などがある。</p>				
越流設備	<p>越流管又はトラフ（図Ⅱ.5のB）の形状のものがあり、ろ過池水位を僅かに上げることにより、水と共にスカム等の浮遊物を排出させる。大きい緩速ろ過池では、両側に設置し、風向きによらず排出できるようにする。越流設備は、ろ過池の水位が、操作ミスにより過剰に上昇した場合の安全策としても機能する。</p> <p style="text-align: center;">基本整理関連カ所（I-2.2）</p>				
水量・水位調節設備	<p>流量計と流出管の制御弁（図Ⅱ.5のC）により、ろ過速度を制御する。両者が連携する自動制御系があるが、緩速ろ過の場合、損失水頭の上昇とそれによるろ過速度の減少が遅いので、マニュアルの制御でもよい。</p> <p>ろ過層内が負圧になりエアバイディングが生じないようにするために、ろ過水の水位をろ過層の表面より高く保つ目的で、ろ過水井に堰（図Ⅱ.5のD）を設ける。固定堰の場合と、損失水頭に応じて水位を変化させることができる</p>				

II 緩速ろ過の設計

	<p>ような、高さ調整板や入れ子管（テレスコープ式管）によるものがある。この場合、ろ過速度が制御できるので、制御バルブは省くことができる。</p> <p>この堰の別の目的として、ろ過水を曝気し溶存酸素濃度を上げ、腐食性の原因となる遊離炭酸濃度を下げること、浄水池の水位変動が緩速ろ過池の運転に影響しないようにすることがある。酸素を含む空気を供給し運転者に有害なガスの蓄積を防ぐために、換気装置が必要である。</p> <p>基本整理関連カ所（I-1.4）（I-3.2）（I-4.2）</p>
ろ過水 流出設備	<p>流出弁（図II.5のE）と浄水池と連絡するろ過水管は、流入管と同様に通常の水理特性、管ロスや乱流を考慮して設計する必要がある。将来原水水質が前処理により改善され、ろ過速度が増大する可能性もあるので、これにも対応できるようにするとよい。現状の処理水量の150%以上に対応できるような配管を設置することが実用的で、初期コストもほとんど変わらず将来の費用も節約できる。</p>
ろ過池水 排水設備	<p>ろ過池の清掃のために、ろ過池の水を排水しろ過膜表面を露出させる必要がある。損失水頭が大きい場合、ろ過を継続させてろ過池の水位を下げようとすると多くの時間が必要となり、ろ過の再開が遅れてしまう。このため、砂面上排水管（図II.5のF）や排水トラフを設置し、ろ過池水を排水するか、原水に戻して別のろ過池で使えるようにする。</p> <p>ろ過池の清掃を繰り返すと、数年後には砂層のレベルが50cmは下がるので、砂面上排水管や排水トラフは、排水水位を調整可能なものとする。</p> <p>排水が速くできれば、ろ過池の休止期間を短くすることができる。3～4.5時間で排水できるように管径を決め、普通は流出管と同径のものとする。</p>
砂層内水 排水設備	<p>ろ過池の水を排出した後、生物ろ過膜と砂層上部を乾燥させ取り易いようにするために、清掃に入る前にろ過層内の水位を10cm以上（約20cm）下げる。この目的で排水弁（図II.5のG）を付ける。補砂、下部集水装置の修理の場合には、砂層内の水は完全に排水する必要がある。砂層内水排水管は、1～1.5時間で排水できるように管径を決め、普通は流出管と同径のものとする。</p>
ろ過水 排水設備	<p>新規又は清掃後のろ過池の成熟期間、ろ過層の細菌作用が確立されるろ過水水質が良好になるまで、ろ過水を排水又は原水に戻すための分岐及び排水弁（図II.5のH）が必要である。</p> <p>基本整理関連カ所（I-2.1）</p>
充水設備	<p>ろ過膜を清掃した後（最初の充水も同様）、ろ過水を底から充水し（図II.5のI）、砂層内の水位が徐々に上げ、ろ過層内の空気を抜く。ろ過水は、ろ過水井又は他のろ過池から導入する。逆送はろ過層表面上10cmまで行う。</p>
その他の 設備	<p>ろ過水井の堰の上流側、下流側を空にするための弁（図II.5のJ、K）を付ける。また、配管やバルブ室の空気だまりを防ぐために換気弁（図II.5のL）を付ける。</p>

II 緩速ろ過の設計



A: 流入仕切弁 B: 越流トラフ C: 流量制御弁 D: ろ過水井の堰 E: 流出弁 F: 砂面上排水
 G: 砂層内水排水弁 H: ろ過水井上流側排水弁 I: ろ過水充水弁 J: ろ過水井下流側排水弁
 K: ろ過水排水弁 L: 換気弁

図 II.5 緩速ろ過池の調節装置 (参考資料 1 より)

(6) ろ過池の覆蓋

事項	水道施設 設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケ ート 60 事業体 (参考資料 10)	-
設置理由	ろ過池の覆蓋は、次のような理由で設置される。 ・低水温によりろ過水水質が悪化することを防ぐ。(例えば、年間数か月 6℃ 以下又は、1 カ月以上 2℃以下が継続する場合) ・凍結を防ぐ(凍結し易く、氷を撤去するコストが高い又は難しい所) ・太陽光を遮り、ろ過池水で藻類の繁殖を防ぐ。 ・風によって運ばれる汚染物質や鳥の糞による原水水質悪化を避ける。 基本整理関連カ所 (I-2.2) (I-4.1)				
構造	低水温及び凍結は、緯度や標高に関係し温帯や寒帯で起こりうる。もし、厳 しい状況であれば保温が必要で、従来、平面のコンクリート屋根を建設し土の 層で覆う方法が使われてきたが、水を含む土の層は重く、耐荷重屋根が必要と なる。現在では、プラスチックフォームのような保温材を張った軽い屋根に変 わってきているが、覆蓋の下で腐食性のある物質が蓄積する可能性もあるの で、構造物の腐食対策に留意する必要がある。 熱帯や亜熱帯で、藻類繁殖対策のみの場合には、保温のための上の層は必要 ではない。小さな緩速ろ過池では、波型の薄い鉄板や草のマットで覆った取り				

II 緩速ろ過の設計

	<p>外し可能な枠の屋根が使われることがあり、水面の直上に設置され、内部を監視する場合は一部を取り外すことができるようにされている。</p> <p>永久構造物の場合、ろ過池上部に広い部屋を設け、ろ過膜の削り取り、補砂作業に十分なスペース、上部空間、アクセスを確保する必要がある。機械的な清掃の場合、屋根は、機械の支持部や他の構成部分と十分離して設置する必要がある。</p> <p>永久構造物でも簡易なものでも、屋根部分の風圧や持ち上げに対する強度が必要である。</p>
--	--

(7) 洗砂設備

事項	水道施設設計指針 (参考資料 3)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	-
設備	<p>汚砂を洗浄して再利用すると、新砂の購入を無くす、又は最小限とすることができるという利点がある。特に、必要な規格の新砂の調達が難しい場合は有効である。洗砂設備の建設コストは必要になるが、将来的に維持管理コストが低くなることもある。</p> <p>設備を浄水場内に設置すると、汚砂及び洗浄砂の輸送コストを最小限とすることができるが、汚砂の貯留、洗砂装置、洗浄砂の格納及び排水処理施設が必要となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・汚砂の貯留槽は、1回の削り取りにより発生する汚砂量を貯留できる容量を確保する。 ・洗砂装置は、汚砂量の約15～20倍の水量で、水圧は200 kPa 必要である。水圧が過大になると、砂の流出を招き易い。洗浄後汚れを含んだ水を処理する設備あるいは排出する配管も必要となる。 ・洗浄砂の格納槽は、覆蓋と排水装置が必要である。容量は、年間削り取り汚砂総量から汚砂貯留槽の容量を引いたものとする。 ・クリプトスピリジウム対策として、洗浄水の濁度が2度以下まで洗浄し、洗浄水は原水として再利用しない。 				

Ⅲ 緩速ろ過の維持管理

(1)ろ過池の立ち上げ（運転開始）

事項	水道維持管理指針 (参考資料 4)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連力所
ろ過池の 充水	ろ過水逆張り 速度 2m/日 砂面上 10-20 cmまで	ろ過水逆張り 砂面上まで水 位上昇	ろ過水逆張り 速度 0.1-0.2m /hr砂面上ま で	-	-
	ろ過池の底から他の池のろ過水を導入し、砂の間隙から空気を抜き、全ての砂表面が水と接触するようにする。これは、エアロックを防止し、ろ過の際水が均等に流れるようにするためである。引き続きろ過水を底から入れ、水位を、原水の導入により砂層の洗掘や乱流による攪乱が起きないようにするまで上げる。原水の流入場所には、砂層に加えてろ過池運用後の生物ろ過膜の攪乱を防止するために、整流壁を設置する、ろ過池の排出トラフの上に流入させる、砂層表面にコンクリートスラブなどの防護を設置するなどの対策が必要となる。原水の導入は、砂層を乱さないように低流速で開始し、その後ろ過池の水のクッションが効くようになれば流速を上げて、ろ過池の運用水位まで水位を上げる。				
ろ過池の 通水開始 ろ過速度	1m/日程度	標準ろ過速度 の 1/4 程度	2.4m/日	-	1 - 2.2
	ろ過水を、ろ過水井から排出し原水に戻すなどしつつ通水を開始する。砂層深くに濁質を侵入させないように低ろ過速度で通水を開始し、その後生物ろ過膜の成熟を待つて順次上昇させる。その間、生物ろ過膜やズーグレアの溶存酸素を確保するために、中断のないよう継続的に通水する。				
生物ろ過 膜の成熟 の判断	ろ過水濁度 0.1 度以下	理化学的(濁 度、色度)、微 生物学的(一般 細菌、大腸菌) 項目	細菌除去率 99%以上	-	1 - 2.1 1 - 2.4
	生物ろ過膜の成熟が進むにつれ、ろ過層の損失水頭が僅かに増加し、生物ろ過膜が次第に視認できるようになる。原水とろ過水の水質分析を行い、ろ過池が十分機能していることを確認後、ろ過水の使用を開始する。ろ過水濁度 0.1 度以下は、日本においてクリプトスポリジウム対策で求められている指針である。また、一般細菌や大腸菌は生物ろ過膜の機能の発現を知るにはよい指標であるが、大腸菌が原水に検出されないような場合には、大腸菌を指標とすることは難しい。一般細菌や大腸菌は、検査結果が得られるまでに少なくとも 1 日は必要となるが、濁度は連続濁度計でも計測可能で瞬時にデータが得られるという利点がある。これらを考慮し、適切な判断指標を定める必要がある。				

III 緩速ろ過の維持管理

生物ろ過膜の成熟の期間 (新設・補砂後)	ろ過機能の回復後(夏季で1ヶ月、冬季では2ヶ月程度)	熱帯地方では数週間、水温が低い温帯ではより長くなる	1週間から数か月と幅がある	-	I - 1.3 I - 2.1
	この期間は、気候条件及び原水水質に依存する。原水水質が清冽であるほど成熟期間は長くなる、また、砂に付着した濁質が多い場合、ろ過水濁度 0.1 度以下に到達させることが難しく、濁質の洗浄除去のための期間が必要となるが、この場合、ろ過速度を上げた方が洗浄効果は高くなる。				
生物ろ過膜の成熟の期間 (清掃後)	夏季1日 冬季7日	1～2日	-	-	I - 2.1
	ろ過池の清掃期間が速ければ速いほど、細菌相の攪乱が少なく、次のろ過膜成熟期間が短くなる。砂層が完全に乾燥状態にならないければ、表面直下の微生物は早期に回復し、新しい砂層レベルでの生息ゾーンが調整される。このような場合には、ろ過膜の再成熟に必要な期間は短くなる。				

(2) ろ過池の運転

事項	水道維持管理指針 (参考資料4)	WHO (参考資料1)	AWWA (参考資料2)	日水協アンケート60事業体 (参考資料10)	基本整理関連力所
最大ろ過速度 (m/日)	4～5(最大8クリプト対策では5)、ろ過速度の上昇幅は標準の10～20%/日	-	9.6	平均 3.09 (0.2～10)	I - 2.2 I - 4.2
	ろ過速度は、流出管の制御弁で制御し、あまり変動させないようにする。ろ過水量を測定するために、弁の直上流にベンチュリメーターを設置する。あるいは、堰又はテレスコープ管を越流する高さで流量を測定する方法もある。 ろ過速度が高いと、濁質の捕捉効率が落ち砂層深く濁質が侵入するおそれがあるが、溶存酸素の供給が多く生物ろ過膜での生物の呼吸や有機物の分解の影響を抑えることができる。ろ過速度が低いと、損失水頭の上昇が抑制できるが、夜間の溶存酸素低下が起り易くなる。必要な浄水量とろ過水水質を監視しつつ、適切なろ過速度で運転する必要がある。				
水質監視	濁度、色度、細菌試験(ろ過膜成熟まで毎日)	理化学的(濁度、色度)、微生物学的(一般細菌、大腸菌)項目の毎日検査	濁度(連続、4hr 毎、毎日)、細菌試験(大腸菌、大腸菌群、毎月)	-	I - 2.4
	定期的に水質監視すべきで、ろ過水の分析は、ろ過池が満足に運転されていることを確認し、原水の分析は処理効率に影響する水質変化を知ることが目的として行う。瞬時のデータが得られる連続水質自動監視装置は有用で、濁度(原水及びろ過水)、全有機炭素(原水及びろ過水) 溶存酸素(ろ過水)、残留塩素				

Ⅲ 緩速ろ過の維持管理

	<p>(塩素注入後の浄水) などがある。微生物学検査(一般細菌、大腸菌)は、生物ろ過膜の浄化機能を確認する上で重要であるが、24時間の培養時間が必要で、データが得られるまでに1日以上が必要であるという問題もある。</p> <p>生物ろ過膜の状況を簡単に知る方法として、アンモニアを測定するという方法がある。アンモニアは、ろ過池が好氣的に保たれている場合ろ過水に検出されないため、その検出は、浄化機能に問題があることの指標となる。</p> <p>これらに加えて、ろ過池水および生物ろ過膜の藻類繁殖状況を調査又は確認することも必要である。</p>				
運転監視	-	水位(ろ過池及びろ過水)、損失水頭、ろ過速度を毎日	水温、損失水頭、ろ過速度を毎日	-	I - 3.1
	<p>運転状況を日常的に監視し、ろ過が不能になることや複数の池が清掃のために同時に停止するというようなことを避ける必要がある。水位(ろ過池及びろ過水)、損失水頭、ろ過速度(あるいはろ過水量)の自動計測は、効率的な運転に有用である。</p>				
溶存酸素の確保	砂層中のDO6-7mg/L	ろ過水 3mg/L以上	-	-	I - 4.1 I - 2.2
	<p>生物ろ過膜に有機物が蓄積していくと、酸素消費量が溶存酸素量を上回ることがある。この場合、ろ過層内で嫌氣的な状態が広がり、鉄、マンガン及びアンモニアの溶出や、異臭の問題が生ずる。昼間、ろ過池水の藻類繁殖により溶存酸素は供給されるが、夜間の溶存酸素の低下に注意する必要がある。</p> <p>原水の酸素消費量が高い場合、あるいは溶存酸素濃度が低い場合は、原水のエアレーションで溶存酸素濃度を増加させる方法もある。また、一時的ではあるが、ろ過水井内で曝気されたろ過水の一部を、原水に再循環させる方法もある。</p> <p>溶存酸素の目安は、生物ろ過膜が部分的に嫌氣的になる可能性を考慮し、ろ過水ではある程度高く設定しておく必要がある。</p>				
ろ過池清掃の判断基準	ろ過水の水位を砂層表面まで低下させない。	損失水頭の上昇	ろ過水の水位を砂層表面まで低下させない。	損失水頭の上昇、生物発生、水質変化	I - 3.1
	<p>ろ過抵抗が急速に増加すると、ろ過池の清掃が必要となる。この指標として、損失水頭を定期的に測定すると、ろ過閉塞の進行とろ過終了の時期が直接分る。損失水頭を測定しない場合は、調節弁の開度で判断することになる。</p> <p>別の判断基準としては、生物ろ過膜の付着藻類など生物量が多くなると、夜間の溶存酸素の低下等の障害が発生し、ろ過停止せざるを得なくなることがある。また、ろ過水水質が僅かに悪化することでも判断できる。</p>				
ろ過継続日数	-	-	-	平均 52.8 (3~365)	I - 4.2
	<p>浄水施設の適切な運転管理のためには、少なくとも2週間以上のろ過継続日数が必要である。また、複数のろ過池を同時に清掃しなければならない事態を避けるために、清掃の判断基準に至らなくてもろ過停止し、清掃を開始することがある。</p>				

Ⅲ 緩速ろ過の維持管理

(3) ろ過池の清掃

事項	水道維持 管理指針 (参考資料 4)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケ ート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連力所
ろ過池の 排水	砂層表面下 約 20cm まで	砂層表面下 10cm 以上まで	砂層表面下 2.5-5cm まで	-	I - 2.3
	<p>ろ過池清掃のためには、原水の流入弁を最初に閉止し、ろ過は出来る限り継続する。植物プランクトンが大量繁殖している場合は、濃縮されて砂層内にもぐり込むことがあるので、ろ過速度の急変に注意する。また、ろ過池の周壁の付着物をブラシ等で洗い落して清掃するが、ブラシ等の先端で生物ろ過膜を剥がし、砂層内に濁質を侵入させることの無いように注意する。</p> <p>ろ過池水位が下がるにつれろ過速度は急速に低下し、排水には多くの時間が必要となるため、ある程度でろ過水の流出弁を閉止し、ろ過池水は砂面上排出弁から排水する。ただし、排水を急激に行うと生物ろ過膜を破壊し砂層内に濁質を侵入させるおそれがあるので注意する。</p> <p>ろ過池水を砂層表面まで排出した後、ろ過水排出弁により、ろ過層内の水位を砂層表面から低下させる。これは、生物ろ過膜が扱いやすいように乾燥させるためである。一方、充水の際の時間と水量の節約と、小動物を砂層深く移動させないために、必要以上に水位を低下させないようにする必要がある。</p>				
削り取り	約 1 cm	1~2cm	1~3cm	-	I - 2.1
	<p>削り取りは、刃の付いた道具（機械）により、出来る限り速く、生物膜とそれに付着している砂を剥がし、うね又は山状に積み重ね、それをろ過池から搬出する。トラクターなどの機械を用いる場合、ろ過砂の表層部分を乱して、細菌叢を攪乱しないようにする必要がある。また、搬出のための手押し車やカートも保護板を敷いた上を走行するようにしなければならない。</p> <p>削り取り後、速やかに表面を均す必要がある。ろ過池の清掃が速ければ速いほど、砂層が完全に乾燥状態にならず、表面直下の微生物は早期に回復し、新しい砂層レベルでの生息ゾーンが調整され、次のろ過膜成熟期間が短くなる。</p> <p>作業の間、作業者自身によるろ過層表面の汚染を最小限とするように注意を払う必要がある。例えば、清浄なブーツを使用させ、衛生的な行動を厳しく要求する、水系伝染病や寄生虫病の兆候のある作業者は、直接または間接的でもろ過層には接触しないようにすることなどである。</p>				

Ⅲ 緩速ろ過の維持管理

(4)補砂

事項	水道維持 管理指針 (参考資料 4)	WHO (参考資料 1)	AWWA (参考資料 2)	日水協アンケ ート 60 事業体 (参考資料 10)	基本整理 関連力所
補砂前 限界砂層 厚さ	40 cm	50～80 cm	50～70 cm	-	I - 1.3 I - 1.4 I - 2.4
	ろ過層の浄化機能(除濁や大腸菌除去能)を維持できる最低限の砂層厚さを確保する。原水中の有機物が多い場合は、生物ろ過膜から砂層内で、有機物分解ゾーンと硝化など無機物酸化ゾーンが分かれて分布するので、最低 40cm の砂層は必要となる。原水の生物分解性有機物が少ない場合は、生物ろ過膜付近で硝化が起こるので、このことは余り考慮する必要がない。また、粒子除去に関して、ろ過水濁度 0.1 度以下を維持するためには、原水濁度にもよるが、ある程度の砂層厚さが必要となる。				
新砂の 補充方法	切り返し	切り返し	切り返し	-	I - 1.3
	ろ過池を長期稼働させると、原水中の不純物や生物化学的な分解生成物が、砂の粒径にもよるが、30cm～50cm の深さまで入り込んでいる。補砂では、その砂をある場所に移動させ、そこに新砂を入れ、さらに元の砂をその上に戻す。これにより、活性のある層が保持され、成熟期間が最小にできる補砂が可能となる。このプロセスは、「切り返し」といわれ、一列ごとに実施する。この際、下の支持砂利層を乱さないよう深く掘りすぎないようにする。最初の列から除去した砂は、長辺方向の片側の上に積み上げて、開削した場所に新砂を入れ、次に隣接する列を開削して、掘り出した旧砂を、最初の新砂の上に積み上げる。順次この操作を繰り返す。これは、「天地返し」ともいわれる。 なお、充水による沈下を見込んで 5～10cm 余盛りをしておくといよい。				
洗砂	削り取った砂を再利用する場合には、洗浄後保管して、将来の補砂に使用する。ろ過池から削り取りした砂は、出来るだけ早く洗浄する。なぜなら、有機物に富んで酸素を消費し続けているので、嫌気になりやすく腐敗し異臭味物質を産生するので、後で洗浄する時それらを除去する必要が生ずるからである。 洗浄では砂粒子に強く付着した有機物被膜は容易に除去できないが、その後空気にさらされた後、この被膜は可溶性となり細菌の成長の栄養となる。このため、新砂より洗砂の方が浄化機能発現に必要な期間が短くなる傾向がある。 また、洗砂時に細かい砂が失われ、有効径が大きくなることもある。これにより、ろ過運転時にろ過層深くに不純物が浸入しやすくなる。				

参考資料

- 1) L. Huismans and W.E. Wood: Slow Sand Filtration, WHO, 1974
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/ssf/en/
- 2) David Hendricks Ed.: Manual of Design for Slow Sand Filtration, AWWA Research Foundation, 1991
- 3) 水道施設設計指針, 日本水道協会, 2012
- 4) 水道維持管理指針, 日本水道協会, 2006
- 5) 小嶋貞男:ろ過 (I) 清澄ろ過, 工学図書, 1968
- 6) 中央大学水処理工学ノート 4 砂ろ過処理
<http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/eisei/jugyou/mizushoriNO4.1.pdf>
- 7) 水質調査報告, 名古屋市上下水道局, 1986~1995
- 8) R. Gimbel, N. J.D. Graham and M. R. Collins Ed.: Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes, IWA Publishing, 2006
- 9) N. Nakamoto, N. J.D. Graham, M. R. Collins and R. Gimbel Ed.: Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes Future Developments and Applications, IWA Publishing, 2014
- 10) 日本水道協会工務部, 工務部における調査研究の概要, 水道協会雑誌, 第 676 号, 74-91 (1991)

参考文献

- 1) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 2) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 3) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 4) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 5) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 6) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 7) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 8) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 9) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.
- 10) J. J. G. van der Vliet, "The Role of the River as a Source of Nutrients for the Estuary," *Journal of Marine Research*, vol. 50, pp. 1-15, 1992.



ロンドン市 Ashford Common 浄水場

1.1 緩速ろ過の濁度管理

- Q I-1.1-① 緩速ろ過の濁度管理はどのようにすればよいか。
- Q I-1.1-② 緩速ろ過において求められているクリプトスポリジウム等対策とは何か。
- Q I-1.1-③ ろ過水濁度の上昇(0.1度以上)の原因と対策は何か。
- Q I-1.1-④ 一時的な原水濁度の上昇による処理不良の原因、影響及び対策は何か。

Q I-1.1-① 緩速ろ過の濁度管理はどのようにすればよいか。

A I-1.1-① 緩速ろ過池は除濁施設であり、良質な浄水とするためには、適切な濁度管理を行う必要がある。水道水の水質基準値は2度であるが、クリプトスポリジウム等対策の通知に従い、ろ過水濁度は0.1度以下を維持する必要がある。濁度管理は以下のように行う。

管理目標値 の設定	<ul style="list-style-type: none"> i ろ過水濁度：0.1度以下（常に0.1度以下を維持するためには、アクションレベルとして、0.07～0.08度を設定する例もある。） ii ろ過池流入水濁度：10度以下（緩速ろ過の粒子除去率99～99.9%を考慮すると、ろ過水濁度の目標値を満たすためには流入水濁度は10度以下の必要がある。）
濁度の監視	<ul style="list-style-type: none"> i ろ過水濁度：稼働中の各池について、連続水質計器での監視若しくは毎日1回以上の測定を行い、管理目標値を満たしていることを確認する。 ii ろ過池流入水濁度：表流水を原水とし、濁度が急変する可能性がある場合は、連続水質計器での監視若しくは毎日1回以上の測定を行う。地下水、伏流水など、原水濁度が10度を超える可能性が少ない場合は、頻度を下げてもよい。
管理目標値 超過時の対応	<ul style="list-style-type: none"> i ろ過水濁度超過時：ろ過放水に切替えるなどの応急的な処置を行い、配水池に管理目標値を超過した水を入れないようにする。その上で、原因究明と改善を図る。（Q I-1.1-③参照） ii ろ過池流入水濁度超過時：取水停止やろ過速度の低下等の処置により、その影響を最小限に抑える。（Q I-1.1-④参照）

Q I-1.1-② 緩速ろ過において求められているクリプトスポリジウム等対策とは何か。

A I-1.1-② 「水道水中のクリプトスポリジウム等対策の実施について（通知）」（平成19年3月30日付健水発第0330005号、厚生労働省健康局水道課長通知）の、緩速ろ過に係る部分は以下のとおりである。

おそれの判断	<p>地表水を原水とする場合は、レベル4（クリプトスポリジウム等による汚染のおそれが高い）に分類される。</p> <p>伏流水・浅井戸水を原水としている場合でも、指標菌（大腸菌及び嫌気性芽胞菌）が検出される場合は、レベル3（クリプトスポリジウム等による汚染のおそれがある）に分類される。</p>
予防対策	<p>ろ過池またはろ過膜の出口の濁度を0.1度以下に維持することが可能なろ過設備（急速ろ過、緩速ろ過、膜ろ過等）を整備すること。</p>
原水等の検査	<p>水質検査計画等に基づき、適切な頻度で原水のクリプトスポリジウム等及び指標菌の検査を実施すること。ただし、クリプトスポリジウム等の除去又は不活化のために必要な施設を整備中の期間においては、原水のクリプトスポリジウム等を3ヶ月に1回以上、指標菌を月1回以上検査すること。</p>
運転管理	<p>i 共通事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ろ過池等の出口の水の濁度を常に0.1度以下に維持すること。そのため、原水水質の変化を浄水処理操作に即時に反映できるようにすること。なお、その際、目視のみによって浄水処理の効果を判断せず、必ず十分に調整された濁度計を用いること。 ・ろ過池等の出口の水の濁度は各ろ過池等ごとに測定することとするが、不可能な場合は、各処理系統ごとに測定することとし、いずれの場合も測定記録を残すこと。 <p>ii 緩速ろ過法における留意事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・生物ろ過膜の損傷を防ぐため、ろ過速度はおおむね5m/日を超えないように、また、ろ過速度の急激な変化が発生しないようにすること。 ・かき取ったろ過砂を再利用する場合には、洗浄水の濁度が2度以下になる程度まで洗浄し、洗浄水は水道原水として利用しないこと。 ・かき取り後、ろ過水を排水しながら、生物膜が再び形成され浄水の濁度が0.1度以下になるまで、低いろ過速度から徐々に速度を上げるようにすること。
水源対策	<p>地表水若しくは伏流水の取水施設の近傍上流域又は浅井戸の周辺にクリプトスポリジウム等を排出する可能性のある汚水処理施設等の排水口がある場合には、当該排水口を取水口等より下流に移設し、又は、当該排水口より上流への取水口等の移設が恒久対策として重要であるので、関係機関と協議のうえ、その実施を図ること。</p>

Q I-1.1-③ ろ過水濁度の上昇(0.1度以上)の原因と対策は何か。

A I-1.1-③ 以下のようなケースが考えられる。

【ケースⅠ】ろ過水の気泡による連続濁度計の誤差

原因	ろ過膜藻類の光合成によりろ過水中の溶存酸素濃度が過飽和となり、発生した微細な気泡を、連続濁度計が濁度として検知してしまう。
現象	光合成は昼間のみ起こるので、昼間にろ過膜を通過したろ過水の濁度が上昇するという日周変動がみられる。ろ過膜に藻類が多いほど、飽和溶存酸素濃度が低い夏季ほど、日照のある晴天日ほど影響が大きくなる。
対策	ろ過水からの気泡発生を抑制するための加圧式濁度計測セルを装備した連続濁度計で測定する。 ろ過水を卓上濁度計で気泡の影響がないことを確認しつつ測定し、連続濁度計の誤差を確認する。

【ケースⅡ】連続濁度計への配管内付着物の剥離の影響

原因	連続濁度計への配管内付着物が管内流速の変動等により剥離し、濁度計測セルに混入することにより濁度として検知してしまう。
現象	短時間の急激な濁度上昇があり、濁度計測セル内が清澄なる過水に入れ替わるまで濁度検知が継続する。
対策	配管内に生物膜等の付着は避けられないので、定期的に配管の清掃を行う。また、濁度計測セルの清掃も定期的に行う。 付着物の剥離の影響が不明の場合は、ろ過水井内の水を直接採水して、配管を通過した水とともに卓上濁度計で測定して比較する。

【ケースⅢ】ろ過開始後、ろ過膜が成熟する前の濁度上昇

原因	生物ろ過膜の成熟が十分でない場合、原水中の濁質の除去が不十分で一部がろ過水中に混入することがある。特に、補砂直後の場合は、新砂に付着した濁質や、旧砂に付着した濁質が補砂を行う際の切り返し作業により剥離し易くなり、ろ過水中に混入することが考えられる。
現象	ろ過放水の継続と共に、ろ過水濁度が減少していく。
対策	生物ろ過膜が成熟し、濁質除去が確実となるまで(ろ過水濁度0.1度以下の継続)、あるいは砂層に付着した濁質が洗浄されるまで、低ろ過速度でろ過放水を継続する。 この間のろ過速度の急変は避ける。

【ケースⅣ】ろ過継続中の濁度上昇

原因	<p>生物ろ過膜に抑留されないで砂層内に侵入した濁質は、部分的な流速変動等により砂層内で付着脱離を繰り返して移動し、最終的にろ過水中に混入することがある。</p> <p>【濁質の砂層内への侵入の原因】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>ろ過池流入部の生物ろ過膜の洗掘</u>：流入部の水流の均等化策が十分でない場合、生物ろ過膜が洗掘されて、その部分から濁質が砂層内に侵入する。 ・<u>濁質の高負荷</u>：原水高濁時や植物プランクトン繁殖時に、生物ろ過膜で除去しきれなかった濁質が、砂層内に侵入する。走光性のある植物プランクトンの場合、昼間に水面付近に集結して増殖し、夜間に生物ろ過膜上に蓄積して負荷となることがある。 ・<u>壁面短絡流</u>：壁面と砂層の境界面で原水の短絡流が発生し、砂層内に濁質が侵入する。 ・<u>砂層内での気泡発生</u>：砂層内が負圧になり微細気泡が発生し、集結した泡が生物ろ過膜を破って水面まで浮上すると、生物ろ過膜に穴が開き、その部分から濁質が砂層内に侵入する。 ・<u>小動物による生物ろ過膜の摂食</u>：生物ろ過膜が小動物により摂食されると、砂層表面の粘着性のあるズーグレアの発達が十分でない場合は、生物ろ過膜が薄くなった部分から砂層内に濁質が侵入する。 ・<u>ろ過膜藻類の浮上</u>：昼間、光合成による溶存酸素による浮力で、生物ろ過膜が剥がれてろ過池表面に浮上すると、砂層表面のズーグレアの発達が十分でない場合は、砂層内に濁質が侵入する。 ・<u>砂層と砂利層の境界層への濁質の蓄積</u>：ろ過膜成熟前に砂層内に侵入した濁質が、ろ過放水で洗浄されず砂層内に抑留されることがある。特に、砂層と砂利層の境界層で、砂利層の粒径が大きい場合、砂利層内にろ過砂が入り込み、その部分に濁質が蓄積し易くなる。 <p>【流速増加の原因】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>処理水量の急変</u>：処理水量を急激に変化させることにより、ろ過速度の急変が起こる。 ・<u>ろ過池流入部の生物ろ過膜の洗掘、砂層内での気泡発生、小動物による生物ろ過膜の摂食、ろ過膜藻類の浮上</u>：これらは、濁質の侵入と共に、ろ過抵抗の減少による部分的な流速増加を引き起こすことがある。
現象	<p>濁質の砂層への侵入後そのままろ過水に混入する場合と、砂層内の移動に時間を要し、時間を経過して濁度上昇がみられる場合がある。また、生物が関与する場合などに、濁度上昇に日周変動がみられることがある。</p>

対策	<p>【濁質の砂層内への侵入防止】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>流入部の洗掘防止</u>：(ろ過池流入部の生物ろ過膜の洗掘) 流入管近くに整流壁を設けて水流が池全体に広がるようにする。あるいは、流入部付近の砂層上にレンガやコンクリートブロックを設置して洗掘を防ぐ。 ・ <u>負荷低減化</u>：(濁質の高負荷) 原水高濁度は、普通沈澱池、粗ろ過などの前処理施設や一時的取水停止により負荷低減化を図る。植物プランクトンは越流管からの排出などにより繁殖を抑える。(Q I-1.3-④参照) ・ <u>負圧抑制</u>：(気泡発生) ろ過水水位を砂層表面より高く保ち、砂層内を負圧にしないようにする。 ・ <u>ろ過池清掃時に湿潤状態を保つ</u>：(壁面短絡流、小動物による生物ろ過膜の摂食、ろ過膜藻類の浮上) 砂層と壁面が解離しないように、ろ過池清掃時に、砂層内の水位を保持して出来る限り砂層を乾燥状態にしない。また、表面付近のズーグレアを早く発達させるために、同じく、出来る限り砂層を乾燥状態にしない。 ・ <u>砂利層粒径の適正化</u>：(砂層と砂利層の境界層への濁質の蓄積) 補砂の時に、砂利層最上部の粒径を砂層粒径の4倍までのものに置きかえる。 <p>【流速増加の抑制】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>ろ過速度を急激に変化させない</u>：急激にろ過速度を増加させると、砂層内の濁質の移動が速くなり、ろ過水への混入の可能性が高くなる。 ・ <u>ろ過膜藻類や小動物による作用は制御しにくい</u>。
----	--

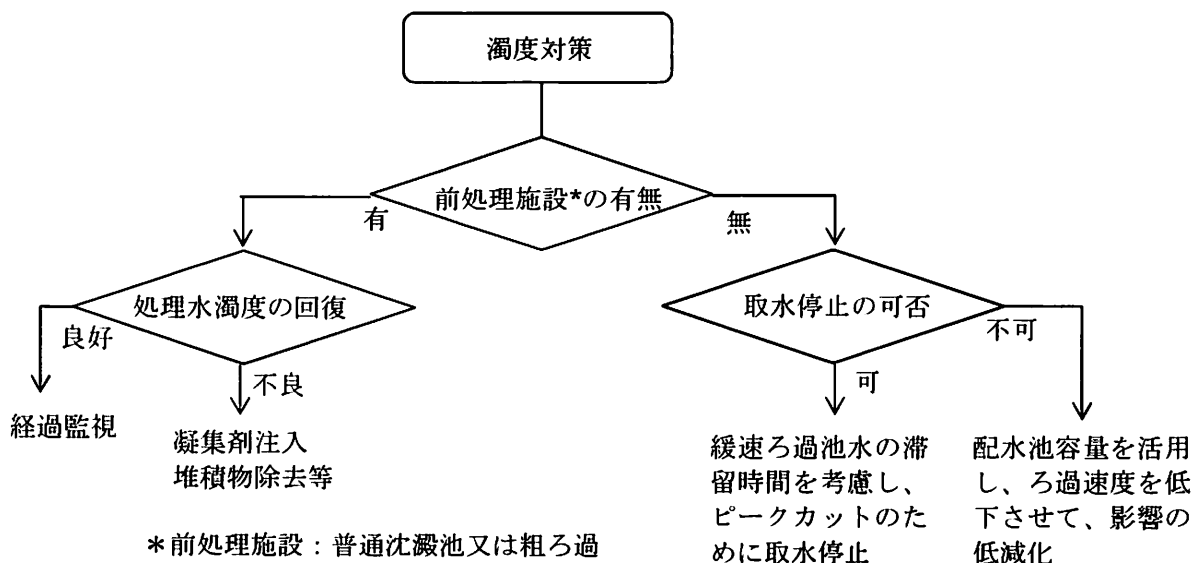
Q I-1.1-④ 一時的な原水濁度の上昇による処理不良の原因、影響及び対策は何か。

A I-1.1-④ 以下のようなケースが考えられる。

原因	<p>降雨等により、原水濁度が急上昇し、許容濁度10度を超える原水が緩速ろ過池に流入し、損失水頭の急上昇やろ過水水質の悪化が起こることがある。</p>
影響	<p>【損失水頭の急上昇】 ろ過の継続が難しくなる。</p> <p>【ろ過水水質の悪化】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>濁度</u>：クリプトスポリジウム対策で求められている0.1度以下を保つことができなくなる。 ・ <u>色度</u>：フミン質等の有機物成分が主体で、生物分解されず付着による除去のみであるため、ろ過水の濃度が高くなる。ただし、後段の塩素注入によりろ過水より低くなる傾向がある。 <p>水質基準値：色度5度</p>

	<p>・消毒副生成物：色度成分などろ過水の有機物濃度が高くなると、塩素注入量の増加も相まって、水道水中のトリハロメタン類、ハロ酢酸類など消毒副生成物濃度が高くなる。</p> <p>水質基準値（単位：mg/L）</p> <p>トリハロメタン類 クロロホルム（0.06）、ジブロモクロロメタン（0.1） プロモジクロロメタン（0.03）、プロモホルム（0.09） 総トリハロメタン（0.1）</p> <p>ハロ酢酸類 クロロ酢酸（0.02）、ジクロロ酢酸（0.03） トリクロロ酢酸（0.03）</p> <p>その他 ホルムアルデヒド（0.08）</p> <p>・塩素酸：塩素注入率が高くなると、次亜塩素酸ナトリウムに含まれる塩素酸の影響で、水道水中の塩素酸濃度が高くなる。</p> <p>水質基準値（単位：mg/L） 塩素酸（0.6）</p>
<p>対策</p>	<p>維持管理上の対策を対応フローチャートに示す。</p>

【対応フローチャート】



消毒副生成物対策：粉末活性炭の注入

塩素酸対策：次亜塩素酸ナトリウムの管理（新鮮な薬品の調達、貯蔵期間の短縮化、温度上昇の抑止等（Q I-1.2-③参照））

1.2 緩速ろ過の残塩管理

Q I-1.2-① 緩速ろ過の残塩管理はどのようにすればよいか。

Q I-1.2-② 残留塩素濃度低下の原因と対策は何か。

Q I-1.2-③ 消毒副生成物濃度上昇の原因と対策は何か。

Q I-1.2-① 緩速ろ過の残塩管理はどのようにすればよいか。

A I-1.2-① 水道法施行規則第 17 条の規定により、給水栓で遊離残理塩素 0.1mg/L 以上、結合残留塩素の場合は 0.4mg/L 以上（汚染のおそれのある場合は遊離残留塩素 0.2mg/L 以上、結合残留塩素の場合 1.5mg/L 以上）保持する必要がある。また、残留塩素濃度があまり高くなると塩素臭が気になるようになり、厚生労働省健康局長通知で示されている水質管理目標設定項目の目標値では 1mg/L 以下、旧厚生省のおいしい水研究会が示したおいしい水の要件では残理塩素 0.4mg/L 以下とされている。このため、水道水の安全性を確保しつつおいしい水を供給するために、給水栓で遊離残留塩素の目標値を 0.1～0.4mg/L としている水道事業者もある。このように、給水区域内での残留塩素濃度を一定範囲に収めるためには、浄水場を含めた残留塩素管理が必要となる。

管理目標値の設定	<p>浄水残留塩素濃度：配水系統での低下を考慮し、浄水残留塩素濃度の目標値を設定する。残留塩素は、浄水中の有機物質（全有機炭素 TOC）と配水管内の錆などによる塩素消費の影響を受け、水温が高いほど浄水場からの到達時間が長いほど濃度低下が大きくなる。浄水場から 1 日程度で到達し、水質も良好で配管の状態も良い場合には、夏季であっても 0.1～0.2mg/L の低下の時もある。</p> <p>例) 0.4mg/L (5月～10月)、0.3mg/L (11月～4月)</p>
残留塩素の監視と塩素注入管理	<p>i 浄水残留塩素：浄水場の出口で、連続水質計器での監視若しくは毎日 1 回以上の測定を行い、管理目標値との差がある場合は塩素注入率を変更する。連続水質計器を活用した塩素注入の自動フィードバック制御もある。</p> <p>ii 給水区域内残留塩素濃度：水道法第 20 条で規定される毎日検査（色、濁り、消毒の残留効果）として、配水系統の代表地点で連続水質計器での監視若しくは毎日 1 回の測定を行う。測定結果により、浄水残留塩素濃度の管理目標値の調整を行う。</p>

Q I-1.2-② 残留塩素濃度低下の原因と対策は何か。

A I-1.2-② 以下のようなケースが考えられる。

【ケース I】次亜塩素酸ナトリウム注入設備の不良

原因	次亜塩素酸ナトリウムの注入ポンプの故障あるいは配管の一部が閉塞して、適正な注入が出来ない。
対策	<p>日常的に注入ポンプ設備のメンテナンスを実施し、機器故障が起こり難いようにし、加えて日常的な点検により異常をいち早く発見する。応急的には代替機に交換し、その間に故障機器を修理する。塩素注入量が低下した時間に応じて、配水池等での混合を考慮して過剰注入を行い、給水栓での残留塩素が0.1mg/Lを下回らないようにする。</p> <p>消毒剤の次亜塩素酸ナトリウム溶液は、タンク内で気泡発生や沈積物生成が起こり易い。このため、配管の狭窄部分がエアロックや沈積物により閉塞することがあるので、日常的に確認しておく必要がある。</p>

【ケースⅡ】降雨後の一時的な原水水質悪化による処理不良の影響

原因	降雨後、流域から濁度や色度成分が流出し、それらを多く含んだ原水が緩速ろ過池に流入すると、特に色度は緩速ろ過では除去し難い有機物質であるため、ろ過水の塩素消費量が上がり、浄水残留塩素が低下することがある。
対策	<p>浄水残留塩素の低下に応じて塩素注入率を増加させる。ただし、浄水残留塩素の測定地点は、配水池での貯留を経た後の水であり、配水池での滞留時間による時間遅れがあることを考慮しなければならない。時間遅れの影響を最小限とするためには、配水池の入口等塩素注入後で十分攪拌された場所で測定する方法もある。</p> <p>また、ろ過水濁度に上昇傾向が認められる場合に、あらかじめ配水池の入口等で残留塩素を確認することで、遅滞のない対応ができる。</p> <p>浄水の残留塩素濃度を確保することが最も重要であるが、塩素注入率を増大させることで消毒副生成物が增大することも考慮する必要がある。このため、濁度管理も合わせて、処理限界を超える原水であれば、前処理での対応や取水停止などが必要である。(Q I-1.1-④参照)</p>

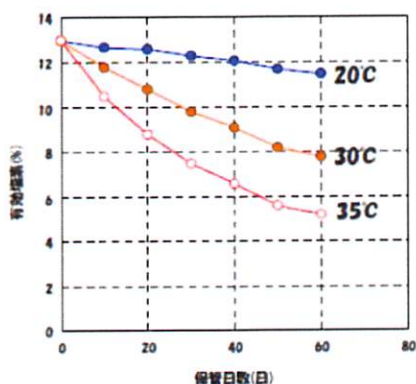
【ケースⅢ】生物ろ過膜の嫌気化によるアンモニアの溶出の影響

原因	生物ろ過膜が嫌気的な状態になると、アンモニアやマンガン等が溶出し、ろ過水の塩素消費量が上がり、浄水残留塩素が低下することがある。特にアンモニアにより結合残留塩素が生成されると、連続水質計器（無試薬式残留塩素計）では正しく計測できないことがあるので、手分析で確認する必要がある。
対策	ろ過継続と共に生物ろ過膜に有機物が蓄積し、夜間は藻類の光合成による酸素供給が無く呼吸による酸素消費が主体となるので、夜間に嫌気的に

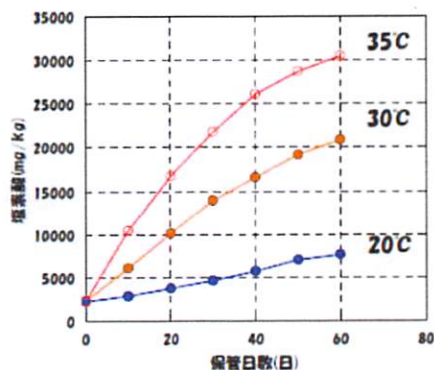
	<p>なる可能性がある。この場合、ろ過速度が低いと影響が大きくなるので、ろ過速度を低下させない運転が必要となる。水運用上可能であれば、ろ過停止しろ過池の清掃を行う。</p> <p>ろ過膜藻類が、昼間光合成により発生した酸素の気泡の浮力により浮上し、風や水流により集積しそこで再沈降により堆積すると腐敗が起り、部分的ではあるがアンモニアやマンガン等が溶出することがある。この場合は、浮上藻類を越流管から排出させる、手作業で取り上げるなどの操作を行う。</p>
--	--

【ケースⅣ】消毒用の次亜塩素酸ナトリウム溶液の劣化

原因	<p>次亜塩素酸ナトリウム溶液は、時間と共に有効塩素濃度が低下する傾向がある。有効塩素濃度が低下すると、一定量の注入のままでは残留塩素濃度が低下する。この場合、浄水の残留塩素の目標値に適合するように注入量を増加させる必要があるが、次亜塩素酸ナトリウムの有効塩素濃度の低下と共に不純物の塩素酸濃度も増加し、その影響が大きくなるので注意する必要がある。</p>
対策	<p>次亜塩素酸ナトリウムを長期間保存すると有効塩素濃度が低下するので、新鮮な薬品を調達するとともに長期間の保存を避ける必要があるが、非常時の供給体制も考慮し適正な貯蔵量を定めておく必要がある。また、液温が高いと濃度低下が大きくなるので、夏季の貯蔵場所の温度上昇を抑える必要がある。さらに、直射日光による分解を避けるため、遮光する必要もある。注入設備では、供給タンク内で古いものから順次注入できるよう構造を工夫する必要がある。</p>



有効塩素濃度の経日変化



塩素酸濃度の経日変化

水道用次亜塩素酸ナトリウムの取扱い等の手引き (Q&A) : 日本水道協会

【ケースV】藻類漏出の影響

原因	ろ過池水に含まれる植物プランクトンが、生物ろ過膜及び砂層を通過して、ろ過水に混入することがある。植物プランクトンは塩素消費物質となる有機物のため、漏出量が多くなると残留塩素濃度低下が起こる。
対策	ろ過池水で植物プランクトンが多く繁殖すると、漏出の可能性も高くなるので、繁殖を抑えるためQ I-1.3-④の対策を講ずる。

Q I-1.2-③ 消毒副生成物濃度上昇の原因と対策は何か。

A I-1.2-③ 消毒副生成物は、塩素消毒に伴い生成する物質で、水道水の水質基準が定められている。(Q I-1.1-④参照) 消毒副生成物の生成は、原料有機物濃度、pH 値、水温、塩素注入率影響を受け、これらの値が高いほど生成量が多くなる。また、時間経過と共に生成量が増加するので、浄水より給水栓水の方が高いことが一般的である。原料有機物としては、原水中の色度成分であるフミン質、植物プランクトンを構成する有機物、生物ろ過膜に蓄積する有機物などがある、また、有機物濃度が高くなると塩素消費が大きくなり塩素注入率を増加させざるを得なくなるので、これによっても消毒副生成物濃度が高くなる。従って、これらを塩素注入前のろ過水にできる限り混入させないような運転が必要となる。

降雨後のフミン質濃度上昇についてはQ I-1.1-④、植物プランクトンについてはQ I-1.3-④、ろ過膜藻類についてはQ I-1.3-⑤の対策を参考にする。

1.3 緩速ろ過の生物の働きと障害

- Q I-1.3-① 緩速ろ過における生物の働きとはどのようなものか。
 Q I-1.3-② 緩速ろ過における生物障害にはどのようなものがあるか。
 Q I-1.3-③ 水源及び沈澱池で繁殖する藻類の影響と対策は何か。
 Q I-1.3-④ ろ過池水で繁殖する藻類の影響と対策は何か。
 Q I-1.3-⑤ 生物ろ過膜で繁殖する藻類の影響と対策は何か。
 Q I-1.3-⑥ 生物ろ過膜で生息する小動物の影響と対策は何か。

Q I-1.3-① 緩速ろ過における生物の働きとはどのようなものか。

A I-1.3-① 緩速ろ過では、生物ろ過膜による浄化作用が大きな役割を果たしている。その浄化機能について、必ずしも十分に解明されているわけではないが、主な生物の働き以下の通りである。生物ろ過膜による濁質の捕捉と細菌類による有機物の分解と無機物の酸化安定化が主な浄化機能であるが、原生動物や小動物も含めた食物連鎖が浄化の促進と長期のろ過継続を可能としている。また、これらの機能を有効に発揮させるためには、好気的な状態を保つ必要がある。

細菌類の働き	有機物（生物分解性有機炭素、かび臭物質、界面活性剤、フェノール類、微量有機化学物質等）の分解、アンモニアの硝化、鉄、マンガンの酸化除去
藻類の働き	光合成による溶存酸素の供給、産生有機物による生物ろ過膜熟成の促進、原水中の濁質の捕捉
原生動物の働き	細菌類の捕食
小動物の働き	より小さな生物やデトリタス（有機残渣）の捕食、損失水頭の改善
適切な運転	好気的な条件下で細菌類の酸化分解反応が進み、動物が維持されるので、好気的な状態を保つ必要がある。特に、呼吸による溶存酸素の減少が顕著になる夜間が重要で、ろ過速度が低いとその影響が大きくなるため、生物ろ過膜成熟後はろ過速度を低下させない必要がある。

Q I-1.3-② 緩速ろ過における生物障害にはどのようなものがあるか。

A I-1.3-② 緩速ろ過では生物が各種の障害の原因となることもある。緩速ろ過で起こり得る生物障害としては、水源及び沈澱池で繁殖した藻類、ろ過池水で繁殖する藻類、生物ろ過膜で繁殖する藻類、生物ろ過膜で生息する小動物などの影響が考えられる。

Q I-1.3-③ 水源及び沈澱池で繁殖した藻類の影響と対策は何か。

A I-1.3-③ その現象、影響及び対策は以下の通りである。

<p>現象</p>	<ul style="list-style-type: none"> ろ過池流入水に、水源又は前処理施設の沈澱池で繁殖した藻類が混入する。 水源では、その環境に応じた藻類が繁殖する。湖沼やダム湖などの止水水域では、植物プランクトン（浮遊藻類）が繁殖し、それらが原水に混入する。藻類の種類は、富栄養化の進行とともに、珪藻類から鞭毛藻類、緑藻類そして藍藻類と遷移するが、緩速ろ過への影響は種類により異なる。水源が河川のみの場合、ほとんどが河床に付着した藻類が剥離したものである。 滞留時間が数日程度の普通沈澱池では、植物プランクトンが自生することは少ないが、上流の水源で繁殖したものが継続的に増殖することがある。また、止水水塊ができるような場合には、そこで植物プランクトンが自生することもある。
<p>影響</p>	<ul style="list-style-type: none"> 藻類の種類による影響として、珪藻類はろ過閉塞、鞭毛藻類は生ぐさ臭の産生、緑藻類はろ過水混入による着色、藍藻類はかび臭と藍藻毒の産生がある。また、種類によらず、生物ろ過膜及び砂層を通過してろ過水に混入した場合、濁度上昇に至ることがある。 藻類が産生する臭気と藍藻毒は緩速ろ過で除去されるので、ろ過閉塞、有機物負荷、ろ過水混入による着色及び濁度上昇が主な影響である。
<p>対策</p>	<ul style="list-style-type: none"> 水源で繁殖する植物プランクトン対策としては、水道用水のみならず他の利用目的も含めた富栄養化ダム湖の水質改善があり、栄養塩負荷削減のための流入水分岐、空気揚水等設置、深層曝気、水面の部分遮蔽などが行われている。また、水道専用ダムでは硫酸銅散布が行われている例もある。 普通沈澱池では、水位制御により、除濁機能を確保しつつ滞留時間をあまり長くしない運用もある。また、流入部及び流出部の工夫により、藻類の生育場所である止水水塊を作らないことが重要である。

Q I-1.3-④ ろ過池水で繁殖する藻類の影響と対策は何か。

A I-1.3-④ その現象、影響及び対策は以下の通りである。

<p>現象</p>	<ul style="list-style-type: none"> ろ過池流入水に水源又は前処理施設の沈澱池で繁殖した植物プランクトンが混入し増殖する。 ろ過池水で植物プランクトンが自生し繁殖する。
-----------	--

影響	<ul style="list-style-type: none"> ろ過水への混入（クラミドモナス、シヌラ等小型藻類） ろ過閉塞（珪藻類、スファエロキスティス等寒天質に包まれる藻類） 生物ろ過膜への有機物負荷による酸素消費の増大（淡水赤潮を形成する鞭毛藻類等）
対策	<ul style="list-style-type: none"> <u>低ろ過速度での運転を継続しない</u>：ろ過池内で止水水塊が形成されると植物プランクトンが増殖し易くなる。ろ過速度が速いと止水水塊が形成されにくくなるとともに、生物ろ過膜に植物プランクトンが貼り付き増殖しにくくなる。 <u>ろ過池清掃時に砂層上部を厚く削り取る</u>：ろ過停止後の排水時に、植物プランクトンが濃縮された状態で砂層上部に侵入していることがあるので、それらを残さないように厚く削り取る。 <u>越流管から表面に集積した藻類を排出する</u>：淡水赤潮等走光性のある藻類は、昼間水面付近に集積し増殖するので、越流管から効率的に排出する。 <u>結合残留塩素（0.3mg/L）により殺藻する</u>：藻類は、遊離残留塩素に強く結合残留塩素に弱い、細菌類は、遊離残留塩素に弱く結合残留塩素に強いので、殺藻には結合残留塩素消毒が効果的である。ただし、ろ過膜生物に影響しないように注意する必要がある、やむを得ない場合にのみ実施する。 <u>ろ過池の遮光</u>：光合成が抑制されるので効果的であるが、既に存在している植物プランクトンやろ過膜藻類が一時に大量死すると、着色や着臭の問題が起こり得るので、注意する必要がある。

Q I-1.3-⑤ 生物ろ過膜で繁殖する藻類の影響と対策は何か。

A I-1.3-⑤ 生物ろ過膜で繁殖する藻類には、以下のような障害（ろ過閉塞、藻類の浮上、遊走子の漏出）も起こり得る。対策として共通するのがろ過池の遮光であるが、光合成を抑制するので、ろ過膜藻類の繁殖を抑えるのに有効ではあるが、一方で生物ろ過膜の成熟に時間を要するなど浄化機能の低下が起こる。このため、原水が清冽でない場合は、遮光はあまり適切ではない。

【ケース I】 ろ過閉塞

現象	<p>ろ過膜にクチビルケイソウ（<i>Cymbella munuta</i>）のような単細胞の付着性珪藻が繁殖する場合、生物ろ過膜が平面的になり損失水頭が上昇する。また、珪藻でなくてもろ過継続と共に生物ろ過膜に藻類の産生有機物が蓄積すると、損失水頭が上昇することになる。</p>
----	---

影響	損失水頭が一定値以上になると、ろ過停止してろ過膜の削り取りが必要となるので、ろ過の継続時間を短くしてしまう。
対策	藻類が砂層上部に侵入し残存していると次のろ過開始時から損失水頭が上昇することがあるので、ろ過池清掃時に藻類を残さないように砂層上部を厚く削り取る。

【ケースⅡ】 藻類の浮上

現象	ろ過膜藻類が糸状藻類の場合、藻体に光合成による溶存酸素が付着し、その浮力によりろ過膜を離れて水面付近まで浮上する。水面付近で、気泡が大気中に放出されると浮力を失い、再び沈降する。
影響	表面付近に浮上した藻類が、風や水流により特定の場所に集積し、そこで再沈降すると、藻類が堆積した場所で腐敗が起こり、部分的な水質悪化が起こる。
対策	藻類の浮上は光合成が起こる昼間に起こり易いので、越流管から効率的に排出させるか、藻類を網等で人力によりすくい出す。

【ケースⅢ】 遊走子の漏出

現象	ろ過膜にアオミドロやサヤミドロなどの糸状の緑藻が繁殖する場合、遊走子が大量放出され、ろ過池水がアオコ状態になることがある。
影響	遊走子は鞭毛と眼点による正の走光性があるので、昼間はろ過池の表層付近に集積し易い。また、しばらくすると遊泳能力を失い、担体に付着し細胞として成長を始める。遊走子の一部が生物ろ過膜及び砂層を通過し、ろ過水に混入し、濁度として検出されることがある。
対策	<ul style="list-style-type: none"> ・越流管から、表面に集積した遊走子を排出する。 ・ろ過停止後の排水時に、糸状藻類が厚く残っている場合には砂層上部に侵入していることがあるので、砂層上部を厚く削り取る。

Q I-1.3-⑥ 生物ろ過膜で生息する小動物の影響と対策は何か。

A I-1.3-⑥ 小動物は、有機物の摂食による分解無機化の促進、その生息及び成長による損失水頭の改善などの寄与があるが、一方で以下のような障害も考えられる。

現象	<ul style="list-style-type: none"> ・小動物（ミズミミズ、ユスリカ、ヒル、カゲロウ、ミズムシなど）が生物ろ過膜で繁殖する。
----	---

影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ろ過水への混入 ・ユスリカの羽化による近隣への迷惑
対策	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>ろ過池清掃時に湿潤状態を保つ</u>：砂層内の水位を保持して出来る限り砂層を乾燥状態にしないようにする。水分がなくなると、小動物が砂層深くに侵入するため、ろ過水に混入し易くなる。 ・<u>砂層上部を厚く削り取る</u>：生物ろ過膜に含まれる小動物をろ過池清掃時にできる限り除去する。 ・<u>残留塩素（30mg/L）で駆除する</u>：残留塩素を含む水を逆張りし、一昼夜放置する。逆張りにより、小動物を上部に追いながら駆除する。ただし、ろ過膜生物や砂層内細菌に影響しないように注意する必要がある、やむを得ない場合にのみ実施する。 ・<u>ユスリカ対策</u>：ろ過池や開渠水位を下げて卵塊を乾燥死させる。ユスリカのライフサイクルを考慮して、羽化前に削り取りを行う。捕虫器による成虫の捕獲や敷地周辺の植栽の確保などにより、近隣への飛散を抑える。

1.4 緩速ろ過のろ過閉塞

Q I-1.4-① 緩速ろ過におけるろ過閉塞の原因と対策は何か。

Q I-1.4-① 緩速ろ過池におけるろ過閉塞の原因と対策は何か。

A I-1.4-① 緩速ろ過では、ろ過の継続と共に損失水頭が上昇し、最終段階では急激に増加するので、ろ過停止し清掃により生物ろ過膜を取り除く。損失水頭の許容範囲は、ろ過池水位とろ過水井水位の差で、通常 1m 程度である。損失水頭は、ろ過速度に比例して大きくなること、水温低下時には水の粘性係数の影響で大きくなることを考慮する必要がある。ろ過池の清掃間隔を短くしてしまうようなろ過閉塞には、Q I-1.1-④で述べた原水濁度の急上昇の他、以下のようなものがある。

【ケースⅠ】原水に含まれる珪藻類によるろ過閉塞

原因	珪藻類は無定形ケイ酸塩の殻をもち、死細胞であっても生物ろ過膜上に蓄積するろ過閉塞を引き起こす。珪藻類は、水源の湖沼やダム湖で繁殖したものが原水中に混入するもので、個体群が成長期にあるような場合には普通沈澱池でさらに増殖することがある。
対策	珪藻類は、比較的清冽な水質の水域で繁殖する種であり、水源で行われる、主に藍藻類を対象とした富栄養化対策に効果があるとはいえない。普通沈澱池や粗ろ過などの前処理施設がある場合には、凝集剤注入によりその細胞数を低下できる可能性がある。塩素注入も可能性があるが、特に粗ろ過の場合、生物処理機能を低下させないような注入率の制御が必要となる。

【ケースⅡ】ろ過池で繁殖する藻類によるろ過閉塞

原因	ろ過膜にクチビルケイソウ (<i>Cymbella minuta</i>) のような単細胞の付着性珪藻が繁殖する場合、生物ろ過膜が平面的になり損失水頭が上昇する。また、珪藻でなくてもろ過継続と共に生物ろ過膜に藻類の産生有機物が蓄積すると、損失水頭が上昇することになる。
対策	遮光は、ろ過膜藻類の繁殖を抑えるのに有効であるが、一方で浄化機能への寄与が失われる。このため、原水が清冽でない場合はあまり適切ではない。 藻類が砂層上部に侵入し残存していると、次のろ過開始時から損失水頭が上昇することがあるので、ろ過池清掃時に砂層上部を厚く削り取る。

【ケースⅢ】凝集剤を注入した水によるろ過閉塞

原因	<p>前処理として凝集剤を注入する場合、生成したフロックを沈澱や粗ろ過により除去しないと、生物ろ過膜上に蓄積して急速な損失水頭の上昇が起こる。</p> <p>沈澱池を経由する場合でも、未凝集の凝集剤成分が残存する場合、生物膜上で凝集が起こり、急速な損失水頭の上昇につながることもある。</p>
対策	<p>凝集剤を使用する場合は、必ず沈澱池や粗ろ過池を経由させる。また、沈澱池を経由させる場合でも沈澱時間を長くするか前ろ過を経由させるなどして、未凝集の凝集剤成分が残存しないようにする。</p>



タイ 緩速ろ過の浄水場

1.5 その他の問題

- Q I-1.5-① 緩速ろ過池で気泡の発生がみられるが、その原因、影響及び対策は何か。
- Q I-1.5-② 寒冷地における凍結防止策にはどのようなものがあるか。
- Q I-1.5-③ 緩速ろ過の覆蓋の利点と問題点は何か。
- Q I-1.5-④ 砂層表面に敷設するシートの利点と問題点は何か。

Q I-1.5-① 緩速ろ過池で気泡の発生がみられるが、その原因、影響及び対策は何か。

A I-1.5-① 以下のようなケースが考えられる。

【ケース I】ろ過池清掃後の通水直後の気泡発生

原因	ろ過池清掃後、他の池のろ過水をろ過池底部から充水しないで、原水をろ過池上部から導入すると、砂層内に残存した空気気泡が発生する。
影響	ろ過池通水後に、砂層内に気泡が残存していると、エアープライディングにより、ろ過層内での均等な水の流れが阻害される。気泡が集合すると浮力により砂層やろ過膜が乱れ、短絡流が発生することがある。
対策	ろ過池清掃後の充水は、ろ過水をろ過池底部から逆張りし、砂層表面から数 10 cm 以上の水位としてから、原水を導入する。

【ケース II】ろ過水流出水位の低下による砂層全体での気泡発生

原因	ろ過水流出水位が、砂層表面より低下すると砂層内全体で負圧が生じ、ヘンリーの法則*により水中の飽和溶存気体濃度（窒素、酸素）が減少し過飽和になるので、気泡発生が起こることがある。過飽和のままろ過水井に流出すれば、砂層内で気泡は発生しない。
影響	砂層内で気泡が発生すると、エアープライディングにより、ろ過層内での均等な水の流れが阻害される。気泡が集合すると浮力により砂層やろ過膜が乱れ、短絡流が発生することがある。
対策	ろ過水流出水位を砂層表面より低下させないように運転する。

*ヘンリーの法則

$$P = E \cdot X \quad P: \text{気相中のガスの分圧 (atm)}, X: \text{液相中の溶存ガスのモル分率}, E: \text{ヘンリー定数 (atm/モル分率)}$$

例) 標高 150m 水温 20℃で水中の飽和溶存気体濃度

	溶存酸素 (mg/L)	溶存窒素 (mg/L)
負圧なし	8.21	18.53
負圧あり (1.0m)	7.42	16.73
負圧あり (2.0m)	6.62	14.94

【ケースⅢ】損失水頭の上昇による生物ろ過膜直下の砂層内での気泡発生

原因	ろ過の進行と共に、生物ろ過膜部分による損失水頭が大きくなると、生物ろ過膜直下の砂層内で負圧が生じ、ヘンリーの法則により水中の飽和溶存気体濃度（窒素、酸素）が減少し過飽和になるので、気泡発生が起こることがある。過飽和のままろ過水に流出すれば、砂層内で気泡は発生しない。
影響	砂層内で気泡が発生すると、エアープラインディングにより、ろ過層内での均等な水の流れが阻害され、損失水頭がさらに大きくなる。また、気泡が集合すると浮力により砂層やろ過膜が乱れ、短絡流が発生することがある。
対策	損失水頭が大きくなった状態でのろ過継続を避け、ろ過池の清掃を行う。

【ケースⅣ】ろ過膜藻類の光合成による気泡発生

原因	砂層表面で繁殖する付着藻類の光合成により水中の溶存酸素が過飽和状態になると、微細気泡がろ過膜藻類に付着し、それらが集合して目に見える気泡となり、水面に浮上することがある。光合成は昼間にのみ起こるが、夜間でも昼間に作られ付着した微細気泡が残存することがある。
影響	付着した気泡の浮力によりろ過膜藻類が剥がれて浮上することがあるが、砂層表面のズーグレアの発達が十分であれば、ろ過水に直接影響を与えることは少ない。また、浮上した藻類が、表面で気泡が抜けることにより再沈降し、風下等特定の場所に堆積すると腐敗が起こることがある。
対策	浮上した藻類は、越流管から効率的に排出させるか、藻類を網等で人力によりすくい出す。

【ケースⅤ】水源で繁殖した藻類による気泡発生

原因	水源のダム湖や原水貯留池で繁殖した植物プランクトンや河川の付着藻類による光合成や水温上昇により、原水中の溶存気体濃度が過飽和になり、着水井やろ過池の流入部分で気泡発生がみられることがある。
影響	特別な影響はない。
対策	—

Q I-1.5-② 寒冷地における凍結防止策にはどのようなものがあるか。

A I-1.5-② 緩速ろ過池の覆蓋の他にいくつかの対応方法がある。

削り取り時	<ul style="list-style-type: none"> ・水位低下時の夜間の凍結を防ぐために、水中ポンプによる噴射で水を流動させる。 ・ろ過池清掃時、出来る限り水位を砂層表面から下げて、削り取りを行う。ろ過水の逆送は、十分に時間をかけ砂面を解氷しつつ充水する。 ・結氷による壁面損傷を避けるため、壁面の結氷を除去する。
運転時	<ul style="list-style-type: none"> ・ろ過池内の結氷とそれによる壁面損傷を防止するため、水中ポンプで池水を攪拌して凍結防止を図る。 ・ろ過池の凍結防止のため、水車（養魚用）を使用している例もある。
補砂	<ul style="list-style-type: none"> ・寒冷期には、補砂作業を行わない。

Q I-1.5-③ 緩速ろ過の覆蓋の利点と問題点は何か。

A I-1.5-③ 緩速ろ過の覆蓋は、その目的に応じて以下のように行われる。

目的	低水温によるろ過水水質の悪化防止	結氷除去作業の費用削減	ろ過池での植物プランクトンの繁殖防止	風及び鳥の糞などによる汚染防止
導入の目安	6℃以下が数ヶ月継続、又は2℃以下が1ヶ月継続	厚い結氷が起る場合	植物プランクトンの繁殖によるろ過継続期間の短縮	水道水水質の劣化（水質基準値への不適合）
覆蓋の構造	断熱を目的とし、平面コンクリートの屋根を土や発泡プラスチックで覆ったもの		遮光のみを目的とし、薄い鉄、プラスチック、遮光シート等による覆い	
	永久構造物：ろ過膜の削り取り作業や補砂作業が容易にできるように上部空間を確保する。 取外し可能なもの：ろ過池の最高水位の直上を覆えばよい。			
覆蓋の問題点	光合成が阻害されるため、生物ろ過膜に付着藻類が繁殖しない。 ・生物ろ過膜の成熟に時間を要する。 ・生物ろ過膜の好氣的細菌のための酸素供給がないので、浄化効率が低下する。 原水水質が清冽でない場合は、覆蓋は適さない。			

Q I-1.5-④ 砂層表面に敷設するシートの利点と問題点は何か。

A I-1.5-④ シート敷設の目的、問題点等は以下のものである。

目的	ろ過砂の表面に不織布のシートを敷くことにより、生物ろ過膜の削り取りの際、汚れたろ過砂の搬出を最小限にすることができるので、補砂の間隔を長くすることができる。
敷設	ろ過池を稼働する際、水流や風により水中のシートがめくれ上がるおそれがあるため、その防止のため重しを乗せて押さえておく必要がある。また、ろ過池全面を覆うことのできるシートは手に入れ難いので、幅1m程度のシートを並べて敷設する。
シートの洗浄	ろ過停止後、落水してシートをろ過池から搬出して、専用の洗浄機で洗浄する。洗浄後のシートは再利用可能である。
問題点	ろ過池面積が大きい場合、敷設及び洗浄時に取り扱うシートが多くなり、重量も大きく作業が困難となる。このため、大規模の緩速ろ過池ではシート敷設は適さない。

2. 維持管理の効率化・簡易化

Q I-2-① 維持管理の効率化・簡易化が必要な理由とは何か。

Q I-2-② 維持管理の効率化・簡易化で留意すべき点は何か。

Q I-2-① 維持管理の効率化・簡易化が必要な理由とは何か

A I-2-① 浄水量が少ない小規模施設では、浄水処理に必要な費用を低減化する必要があり、維持管理の効率化及び簡易化が求められる。小規模施設は水源水質が良好で安定しているところに設置されていることが多く、凝集剤注入や複雑な前処理を必要としない、ろ過継続日数を長くすることができる等の利点があり、これらを活用した効率的な維持管理を行う必要がある。

Q I-2-② 維持管理の効率化・簡易化で留意すべき点は何か

A I-2-② どのような緩速ろ過施設でも、適切な濁度管理及び残塩管理を実施し、安定的な水質の浄水が得られるようにする必要がある。また、一時的な原水水質の悪化、施設や設備の異常や故障があったとしても、迅速に対応し水道水水質に影響しないような維持管理を行う必要がある。

2.1 緩速ろ過の運転監視

- Q I-2.1-① 緩速ろ過池の運転のために最低限必要な計装設備は何か。
- Q I-2.1-② 緩速ろ過池各池に流量計や損失水頭計がない場合、どのような運転をすればよいか。
- Q I-2.1-③ 緩速ろ過池の運転のために、どのような連続水質計器を設置すればよいか。
- Q I-2.1-④ 連続水質計器がない場合、代替としてどのような水質監視をすればよいか。
- Q I-2.1-⑤ 維持管理のために、濁度や残留塩素の他にどのような水質測定を行えばよいか。
- Q I-2.1-⑥ 生物ろ過膜の成熟を確認しろ過開始をするのは、どのように判断すればよいか。
- Q I-2.1-⑦ 損失水頭の上昇以外に、ろ過停止しろ過池を清掃するのはどのような場合か。

Q I-2.1-① 緩速ろ過池の運転のために最低限必要な計装設備は何か。

A I-2.1-① 緩速ろ過池の適切な運転のためには、各池にろ過流量計及び損失水頭計が必要である。

ろ過流量計	<p>ろ過流量又はろ過速度を制御する場合、ろ過流量を確認しつつ弁操作を行う。以下のような場合に必要となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> i 生物ろ過膜を成熟させ、ろ過開始後標準的なろ過速度に至るまで、徐々にろ過速度を上げる時 ii 水需要に応じてろ過流量を変化させる必要がある時。ろ過速度を急変させると浄化機能に影響があるので、徐々に変化させる
損失水頭計	<p>ろ過の継続とともに生物ろ過膜部分での損失水頭が増加するので、ろ過池の清掃時期を判断するために損失水頭計を設置する。</p> <p>ろ過継続末期には急速に損失水頭が上昇するので、ろ過停止を適切に判断できないと、ろ過池水の排水及びろ過膜削り取りのための表面の乾燥がし難くなり、削り取り作業が難しくなる。</p>

Q I-2.1-② 緩速ろ過池各池に流量計や損失水頭計がない場合、どのような運転をすればよいか。

A I-2.1-② ろ過池流量制御の方法として、ろ過池水位を一定に保ちろ過水の流出弁を操作する方法と、ろ過水の流出弁開度を一定に保ちろ過池水位を変化させる方法がある。

前者の場合、標準的なろ過速度に至るまで、流出弁の開度を目安として流量を制御することができる。開度の目安は、これまでの運転実績をもとに経験的に求める。ろ過継続とともに損失水頭が増加すると弁開度とろ過速度の関係が変化するので、損失水頭を考慮して弁開度の尺度を設定する必要がある。また、ろ過水井の堰に三角堰や四角堰を設け越流水深を測定することで流量を推定することもできる。損失水頭計がない場合は、ろ過流量の低下をろ過停止の判断基準とする。

後者の場合も、標準的なろ過速度に至るまでの流量は流出弁の開度により制御する。流出弁の開度を一定にした後は、ろ過池水位が損失水頭に相当するので、簡易に水位が測定できるようにし、水位をろ過停止の判断基準とする。

Q I-2.1-③ 緩速ろ過池の運転のために、どのような連続水質計器を設置すればよいか。

A I-2.1-③ 緩速ろ過での浄水処理プロセスは除濁と消毒であり、工程管理は濁度管理と残留塩素管理になるので、必要な連続水質計器は濁度計と残留塩素計である。また、生物ろ過の機能を維持するためには、夜間においても生物ろ過膜が好氣的に保たれる必要がある。このために、ろ過水の溶存酸素濃度を連続水質計器により測定することがある。これらの計器は、設置費用及び維持管理費用は必要ではあるが、無人で連続的に水質データが得られる、校正を適切に行えば正確なデータが得られる、管理目標値の警報設定が可能、電子データで過去データの蓄積ができるなどの利点がある。

濁度計	<p><u>機器</u>：クリプトスポリジウム等対策で求められている濁度 0.1 度以下を正確に測定できる機器が市販されている。機器によっては、過飽和気体を濁度として計測してしまうものもあるので、測定セルが加圧式のものなど影響がない機種を選択する必要がある。</p> <p><u>設置</u>：ろ過水が測定できるよう各池に設置することが望ましいが、複数の池のろ過水を順次濁度計に導入し測定する方法がある。この場合も含めて、濁度計への試料水供給配管が長くなると、過飽和気体による管の閉塞と、管内の付着生物膜が剥離し濁度に影響することがあるので注意する必要がある。</p> <p><u>活用</u>：管理目標値を設定し、ろ過開始の判断基準とする。また、警報を設定し、管理目標値を超過した場合には、ろ過停止やろ過放水に切替えてろ過水を原水に戻すなどの対応を行う。</p> <p><u>その他</u>：原水濁度の変動が大きく処理限界を超えるような可能性がある場合には、原水にも濁度計を設置し、迅速な対応が可能にする。</p>
-----	--

残留塩素計	<p><u>機器</u>：0.1～2mg/L を正確に測定できる機器が市販されている。有試薬式と無試薬式のものがある。無試薬式は、アンモニアによる結合残留塩素が多い場合、水中の溶存イオンが少なく電気伝導率が低い場合、pH 値の変動が大きい場合に計測誤差が大きくなる。有試薬式は、これらの影響がないよう設計されているが、試薬の供給と廃液の処理という問題がある。水質が良好で変動が少ない場合は、無試薬式でほとんど問題がないケースが多い。</p> <p><u>設置</u>：塩素注入後十分攪拌された後の浄水池の出口等に設置する。</p> <p><u>活用</u>：残留塩素計の値に応じて塩素注入を調整する。</p>
溶存酸素計	<p><u>機器</u>：0～20mg/L を正確に測定できる機器が市販されている。</p> <p><u>設置</u>：特にろ過継続日数が長くなりろ過膜に有機物が蓄積してきた場合に重要であるため、固定設置ではなく可搬式のもので必要な池について測定してもよい。</p> <p><u>活用</u>：ろ過水の溶存酸素が 4mg/L を下回らないように、ろ過速度を増加させるなどの対応を行う。</p>

Q I-2.2-④ 連続水質計器がない場合、代替としてどのような水質監視をすればよいか。

A I-2.2-④ 緩速ろ過では、生物ろ過膜藻類の光合成に起因する水質の日周変動が起こり得る。このため、連続水質計器がない場合には、少なくとも昼夜 2 回、可能であれば 6 時間ごとに、手分析でろ過水濁度と浄水の残留塩素を測定する。残留塩素計は水道水で通常使用されるものでよいが、濁度計は 0.1 度が正確に測定できる卓上濁度計が必要となる。溶存酸素は、夜間に生物ろ過膜を通過する時間帯のろ過水の濃度を測定する。

Q I-2.1-⑤ 維持管理のために、濁度や残留塩素の他にどのような水質測定を行なえばよいか。

A I-2.1-⑤ 水道水が常に水質基準に適合するように、そして緩速ろ過池が適切に維持できるという点から、水質測定の必要性を検討する。

水道法第 20 条で定められた、給水栓水の水質基準項目の検査があり、項目によって異なるが、月 1 回から 3 年に 1 回の頻度で行われている。また、原水についても、厚生労働省水道課長通知で少なくとも毎年 1 回は検査することとされている。これらの検査結果から、検出頻度が高く水質基準値に近い値で検出される項目については、頻度を上げて測定し原水及び浄水の変動の状況を確認する。その上で、水質基準の適合性に影響するような状況であれば、維持管理項目として頻度を増加させて測定する。

また、緩速ろ過に特有な原水監視項目として、生物ろ過膜の好氣的状態の維持の観点から、アンモニア態窒素、全有機炭素 (TOC)、生物化学的酸素要求量 (BOD)、浮遊性藻類数及び付着性藻類数の項目がある。これらについても、問題になるレベル若し

くは変動が大きい場合を除いて、長期的な変動を把握するための測定とし、維持管理項目として測定する必要はない。

Q I-2.1-⑥ 生物ろ過膜の成熟を確認しろ過開始をするのは、どのように判断すればよいか。

A I-2.1-⑥ 判断指標として、除濁機能の確認にはろ過水濁度、生物学的な浄化機能を確認するにはろ過水の一般細菌又は大腸菌が適している。濁度は、クリプトスポリジウム等対策で示された 0.1 度が判断基準としてよく、0.1 度以下の維持を確実にするために、0.08 度以下や 0.05 度以下の目標値が使われる。濁度は連続水質計器により測定可能で、迅速な対応にも優れている。ただし、伏流水等原水濁度が低い原水の場合、ろ過水濁度だけでは生物ろ過膜の成熟が判断できないことがある。この場合には、以下の生物学的な浄化機能の確認も併せて行う。

一般細菌又は大腸菌は、後段の消毒により不活性化されることから、水質基準値を判断基準とする必要はなく、除去率 99% が目安となる。しかし、原水中の存在量が少ない場合は除去率が求めにくいこと、水道法の大腸菌の検査は定性試験であること、専用の試験室が必要なうえ結果が得られるまでに 24 時間の培養が必要なことなどの問題点がある。このため、濁度の補完的な指標として活用する。

生物浄化機能の発現の指標としては、他に溶存酸素があり、光合成や呼吸を行う生物の存在を溶存酸素濃度の日周変動により確認することもできる。

原水水質が良好で濁度や細菌類がほとんど検出されないような場合には、通水後ろ過開始までの日数を、安全性を考慮したうえであらかじめ定めておき、ろ過水の濁度や細菌類の試験結果は補完的に使用する方法もある。

Q I-2.1-⑦ 損失水頭の上昇以外に、ろ過停止しろ過池を清掃するのはどのような場合か。

A I-2.1-⑦ 以下のような場合が考えられる。

藻類の顕著な堆積 溶存酸素の低下 残留塩素の低下	ろ過膜藻類や植物プランクトンが多量に繁殖する場合、生物ろ過膜に対する有機物負荷が大きくなり、溶存酸素の低下や残留塩素の低下に至ることがある。この場合、ろ過を停止して清掃する。
ろ過水濁度 0.1 度 超過	砂層内に抑留されていた濁質がろ過速度の変動によりろ過水に混入する場合などに、ろ過水濁度が 0.1 度を超過して検出されることがある。ろ過放水に切替えるなどの対応を行っても解消しない時は、ろ過池を停止して清掃する。

2.2 緩速ろ過の効率的又は簡易な運転

- Q I-2.2-① 緩速ろ過池の運転開始において、最低限必要な操作は何か。
- Q I-2.2-② 緩速ろ過池の運転において、ろ過速度はどのように変化させるのか。
- Q I-2.2-③ 緩速ろ過池の清掃において、最低限必要な操作は何か。
- Q I-2.2-④ 水運用に応じて処理水量を減少させる場合、どのような運転をすればよいか。
- Q I-2.2-⑤ 塩素注入はどのように制御すればよいか。
- Q I-2.2-⑥ 次亜塩素酸ナトリウムはどのように管理すればよいか。
- Q I-2.2-⑦ 緩速ろ過池の補砂において、最低限必要な操作は何か。

Q I-2.2-① 緩速ろ過池の運転開始において、最低限必要な操作は何か。

A I-2.2-① ろ過池の削り取りから運転開始まで、以下の操作が必要となる。清掃時に砂層内に混入した空気を抜くことと、生物ろ過膜成熟前に濁質を砂層内に侵入させないことに留意する。

他の池のろ過水を下から充水 (逆張り)	砂層内の空気を抜く、原水流入時の洗掘によるろ過層の乱れを防ぐ。
原水の導入	ろ過池の運転水位まで、水位を上げる。
ろ過放水	ろ過水を原水に戻しつつ(排水しつつ)、低ろ過速度で生物ろ過膜を成熟させる。
ろ過開始	ろ過水の濁度を確認したうえで使用を開始し、塩素注入後浄水池に入れる。

Q I-2.2-② 緩速ろ過池の運転において、ろ過速度はどのように変化させるのか。

A I-2.2-② ろ過開始後標準ろ過速度に至るまで、徐々にろ過速度を上げる。ろ過速度を急変させて濁質を砂層内に侵入させないようにする。経験の蓄積から適切な方法を定めてマニュアル化しておく必要があるが、例えば、標準ろ過速度の20%で運転を開始し、その後、ろ過水濁度を確認しつつ毎日1回10~20%程度ろ過速度を増加させて標準ろ過速度に至るようにするなどの方法がある。

Q I-2.2-③ 緩速ろ過池の清掃において、最低限必要な操作は何か。

A I-2.2-③ ろ過停止後、ろ過池の清掃には以下の操作が必要となる。削り取り作業を容

易にするためにある程度の乾燥は必要であるが、乾燥しすぎると次の生物ろ過膜成熟に時間を要するので、できる限り短期間で清掃作業を終える。

ろ過池の排水	砂層表面下 20cm 程度まで水位を下げる。下げ過ぎると小動物が深く移動する。
削り取り	表面 1 cm 程度を削り取り、表面を平坦に均す。砂層を完全に乾燥状態にしない。

Q I-2.2-④ 水運用に応じて処理水量を減少させる場合、どのような運転をすればよいか。

A I-2.2-④ 水運用により緩速ろ過での処理水量を減少させなければならないこともある。その場合、各池のろ過流量を減少させるか、ろ過池を休止させる方法がある。その際、以下の点に留意する必要がある。

ろ過流量の減少	ろ過継続日数が長い池は、生物ろ過膜部分に有機物が蓄積しており、夜間に溶存酸素が減少しろ過膜が嫌気の状態になるおそれがある。ろ過継続日数が長い池はろ過速度を変更しないようにするか、溶存酸素を確認しつつ変更する。部分的な嫌気部分が発生することを考慮すると、ろ過水溶存酸素の目安は 4mg/L 以上である。
ろ過池の休止	ろ過池を休止させる場合、生物ろ過膜が腐敗する可能性があるため、ろ過池に水のある状態で休止したり、生物ろ過膜を削り取らないまま放置しないようにする。 削り取り終了後に休止する場合は、砂層が乾燥状態になるため、補砂後と同様に次の運転の生物ろ過膜の成熟に期間を要することを考慮し、あらかじめ長いろ過放水期間を見込む必要がある。

Q I-2.2-⑤ 塩素注入はどのように制御すればよいか。

A I-2.2-⑤ 給水栓水の残留塩素を確保できるように塩素注入率の調整を行う。

給水栓水の残留塩素	毎日検査で測定されているので、その目標を定める。 例：0.1～0.4mg/L)
-----------	--

浄水場浄水の残留塩素	<p>配水池や配水管網での減少を考慮し、給水栓水の目標値が達成できるような目標値を定める。残留塩素の減少は水温の影響を受ける可能性があり、季節により変更する必要もある。連続水質計器で測定している場合は、警報設定しておくが効率的である。</p> <p>例) 0.4mg/L (5月～10月)、0.3mg/L (11月～4月)</p>
塩素注入率の調整	<p>浄水の残留塩素が目標値と差がある場合 (通常 0.1mg/L 以上)、塩素注入量を調整する。</p>

Q I-2.2-⑥ 次亜塩素酸ナトリウムはどのように管理すればよいか。

A I-2.2-⑥ 消毒剤として使用する次亜塩素酸ナトリウム溶液は、製造後時間と共に有効塩素濃度が減少し、不純物である塩素酸濃度が増加する。このため、同じ注入量でも残留塩素濃度が低下することや、残留塩素を確保するために注入量を増加させると浄水の塩素酸濃度が増加することがある。以下の点に注意して管理する。

新鮮な薬剤の購入	<p>製造後の時間経過と保管状態の影響を受けるので、できる限り新鮮な薬剤を納入させる。可能であれば、有効塩素濃度 (通常は 12%) を確認する。</p>
冷暗所での保管	<p>有効塩素の分解は、温度と光 (紫外線) の影響を受けるので、冷暗所に保管する。保管する量も、予備を確保しつつ保管期間が長くないように (数ヶ月程度以下) 調整する。</p>
塩素注入	<p>次亜塩素酸ナトリウムは、有効塩素が分解して酸素が発生したり、沈積物が生成することがある。注入装置の細い管の部分がエアロックや沈積物により閉塞することがある。ガス抜き部分を設けるか定期的に清掃する。</p>
残留塩素の確認	<p>注入のための次亜塩素酸ナトリウム槽に新たに補給する場合、有効塩素濃度が大きく変化することがあるので、浄水の残留塩素濃度に注意し、必要に応じて注入量を調整する。</p>
塩素酸の確認	<p>水質基準項目の検査結果により、給水栓水の塩素酸濃度が高くなっていないか確認する。水質基準値は 0.6mg/L であるが、施設基準の浄水薬品の基準は 0.4mg/L である。これらの値に近いようであれば、次亜塩素酸ナトリウムの管理方法を再検討する。</p>

Q I-2.2-⑦ 緩速ろ過池の補砂において、最低限必要な操作は何か。

A I-2.2-⑦ 補砂の方法として、新しい砂を古い砂の下に敷き込む切り返し（天地返し）が必要であるが、洗砂した砂を古い砂の上に補給することも行われている。

切り返し (天地返し)	砂層が一定の厚さに減少した場合、古い砂を一旦移動させて、その場所に新しい砂を入れ、さらにその上に元の砂を戻す。作業は容易ではないが、古い砂が表層になることにより生物ろ過膜の成熟が速くなる、砂層下部の砂も順次使用することになるので汚れが蓄積しない、砂利層まで掘込むことで汚れの状態を確認できるなどの利点がある。
洗砂した砂の 補給	洗砂した砂を削り取った後に補給する。作業の容易さのみならず、洗砂した砂の保管期間を短くすることで、新しい砂より生物ろ過膜の成熟が速くなることや保管場所の節減という効果もある。 一方、砂層下部や砂利層上部の汚れが確認できないので、それについて定期的に確認する必要がある。
補給する砂	新砂、洗浄砂に係らず、砂に付着している濁質が多いと、補砂後のろ過放水期間が極めて長期間となることがある。日本水道協会のろ過砂の規格では、洗浄濁度 30 度以下が定められているが、この値は出来る限り低い方がよい。

2.3 緩速ろ過の無人運転

Q I-2.3-① 緩速ろ過池の無人運転とはどのようなものか。

Q I-2.3-② 無人運転が可能な条件とは何か。

Q I-2.3-① 緩速ろ過池の無人運転とはどのようなものか。

A I-2.3-① 緩速ろ過では、一定のろ過速度で運転を継続する場合にはほとんど操作が必要なく、効率的な運転が可能となる。以下の設備の整備により、遠隔制御も可能となる。ただし、ろ過開始に至る操作、ろ過停止、ろ過池の清掃、ろ過池の充水の各操作、及び補砂作業の遠隔制御化は費用対効果からみても難しいので、現地での作業となる。

内容	目的
ろ過流量を制御する弁の電動化・遠征化	ろ過流量（ろ過速度）の制御
流量計のデータの電送	ろ過流量（ろ過速度）の制御
ろ過水濁度のデータの電送	ろ過開始の判断、ろ過停止の判断
浄水残留塩素のデータの電送	塩素注入の調整

Q I-2.3-② 無人運転が可能な条件とは何か。

A I-2.3-② ろ過継続期間が長くなる場合、遠隔制御化の効果が大きくなる。このためには、原水水質が良好で安定的なろ過が継続できること、越流管からの排出等によるろ過膜藻類の制御が容易なことがあげられる。

3. 前処理の事例

- Q I-3-① 緩速ろ過の前処理とは何か。
 Q I-3-② 前処理の対象には何があるか。
 Q I-3-③ 濁度のための前処理にはどのようなものがあるか。
 Q I-3-④ 植物プランクトンのための前処理にはどのようなものがあるか。
 Q I-3-⑤ 有機物、アンモニアのための前処理にはどのようなものがあるか。
 Q I-3-⑥ その他の前処理にはどのようなものがあるか。

Q I-3-① 緩速ろ過の前処理とは何か。

A I-3-① 原水水質に起因して、ろ過水水質の悪化やろ過池の清掃頻度の増加などの問題が起こる場合、ろ過池に対する負荷を低減化させるために、前処理プロセスを付加させる。また、緩速ろ過により除去あるいは低減化できない物質を対象とした前処理が必要なこともある。

Q I-3-② 前処理の対象には何があるか。

A I-3-② 前処理の対象としては以下のようなものがある。

影響	項目
損失水頭の上昇、ろ過閉塞	濁度、植物プランクトン
酸素消費の増加	植物プランクトン、溶存酸素、BOD、TOC、アンモニア態窒素
緩速ろ過池のみでは処理しにくい物質	カルシウム、微量有機化学物質、油（水質事故）

Q I-3-③ 濁度のための前処理にはどのようなものがあるか。

A I-3-③ 緩速ろ過池の原水の管理目標値は 10 度であり、それを超えるケースが頻発する場合は下記のような前処理施設を検討する。

施設	内容
普通沈澱池 凝集剤注入 - 普通沈澱池	・普通沈澱池は、自然沈降により濁質を沈降させ上澄水を得るものである。粒子除去率は V/V_0 で示され、 V は粒子沈降速度、 V_0 は表面負荷率 ($=Q/A$: Q は流量、 A は表面積) である。処理水量が少ないほど、表面積が大きいほど、また、粒子が大きいほど沈降速度が大きくなり、除去率が高くなる。

	<ul style="list-style-type: none"> ・原水濁度が上昇し、沈澱処理水の濁度が10度を超えるような場合には、凝集剤を注入し沈澱効率を上げる方法がある。原水と凝集剤を混合する必要があるが、フロック形成池は必ずしも必要ではない。ただし、未反応の凝集剤や微細フロックが沈澱処理水に混入する場合は、緩速ろ過池の生物ろ過膜での損失水頭が著しく上昇することがあるので、滞留時間を十分確保する必要がある。
粗ろ過	<ul style="list-style-type: none"> ・砂利層を通過させることで、原水の濁度を低減化させる。次第に目詰まりするので、逆流洗浄が必要となる。上向流式と下向流式があるが、上向流式の方が逆流洗浄のための施設が簡易になる。 ・使用と共に砂利表面に生物膜が生成し、アンモニアの低減化など生物酸化の効果もある。
凝集沈殿池 凝集沈殿 - 一次ろ過	<ul style="list-style-type: none"> ・原水濁度が常に高い場合、凝集沈殿により原水の濁度を低減化させる。沈澱水に微細なフロックや微量の未凝集の凝集剤成分が含まれる場合、緩速ろ過池で著しいろ過閉塞が起こることがある。このような場合、砂利等をろ材とした一次ろ過を付加することでフロックの流出を抑えることができる。
伏流水取水 河岸浸透ろ過	<ul style="list-style-type: none"> ・伏流水取水は、河岸に集水埋渠を敷設して伏流水を取水する方法で、河床でのろ過により河川水の濁度を低減化できる。 ・河岸浸透ろ過は、河川付近の浅井戸により取水する方法で、伏流水より浸透距離と時間が長く、より安定的な水質が得られるが、十分な水量が得られることが必要である。

Q I-3-④ 植物プランクトンのための前処理にはどのようなものがあるか。

A I-3-④ 水源の湖沼やダム湖で繁殖し原水含まれる植物プランクトンや普通沈澱池で繁殖した植物プランクトンを対象としたものと、ろ過池水での植物プランクトンの繁殖を抑えるものがある。

施設	内容
マイクロストレーナー	<ul style="list-style-type: none"> ・植物プランクトンを多く含む原水または普通沈澱池の沈澱水を、金属製または合成樹脂製の網でろ過する方法である。網の目開きは50~100μm程度で、すべての植物プランクトンを除くことはできないが、有機物負荷の低減は可能である。

結合残留塩素注入	<ul style="list-style-type: none"> ・緩速ろ過池の植物プランクトン対策として、結合残留塩素の注入が行われることがある。残留塩素の特性として、遊離残留塩素は藻類より細菌類に効果があり、結合残留塩素は細菌類より藻類に効果があるという点から、結合残留塩素を選択する。ただし、既に植物プランクトンが多く存在する場合、大量死により有機物負荷が大きくなることや、ろ過膜藻類まで死滅させるという問題があるので、通常は行うべきではない。
----------	--

Q I-3-⑤ 有機物、アンモニアのための前処理にはどのようなものがあるか。

A I-3-⑤ 有機物負荷及びアンモニアによる酸素消費の低減を図るため、以下のような前処理が行われる。

施設	内容
エアレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水や湖沼の深層水など溶存酸素が低い原水の場合、空気を吹き込むことにより溶存酸素濃度を上昇させることができる。これにより、有機物の酸化及びアンモニアの硝化も促進させることができる。 ・原水をカスケード状の池に流し、空気に触れさせることにより溶存酸素濃度を上げる方法もある。この場合、カスケードの底面に鉄、マンガンや生物膜が生成し、溶存鉄、マンガン、アンモニアの酸化が効率的にできる。
凝集沈殿池	<ul style="list-style-type: none"> ・凝集沈殿により有機物を沈殿除去することができる。特に、緩速ろ過池で処理しにくいフミン質の除去に有効である。緩速ろ過池への影響等はQ I-3-③と同じである。
前塩素注入	<ul style="list-style-type: none"> ・原水中のアンモニアが高い場合、塩素注入により分解させる方法がある。この場合、生物ろ過膜に影響がないように、結合残留塩素が消失し遊離残留塩素も最小濃度となるブレイクポイント処理を行う。塩素注入量はアンモニア態窒素の10倍が目安であるが、アンモニア態窒素の変動に合わせて塩素注入率を調整することは容易ではない。
オゾン酸化	<ul style="list-style-type: none"> ・有機物の分解を目的としてオゾン酸化が使用される。難分解性有機物が分解されて易分解性有機物に変化し、緩速ろ過池の生物ろ過膜で除去される。日本では、酸化副生成物を除去するために後段に粒状活性炭ろ過が付けられるが、海外ではオゾン酸化のみのケースもある。

Q I-3-⑥ その他の前処理にはどのようなものがあるか。

A I-3-⑥ その他、以下のような前処理が行われる。

施設	内容
硬度低減化 (ソフトニング)	<ul style="list-style-type: none"> ・原水中の硬度が高い場合に、水酸化ナトリウムでアルカリ性にして、微細な粒子を核にして炭酸カルシウムのペレットを作成し、硬度を低減化する。
原水貯水池	<ul style="list-style-type: none"> ・数日以上以上の貯留能力を持つ原水貯水池は、普通沈澱池の役割の他、水質変動の緩和、水源水質事故時の取水停止期間の原水確保等に活用できる。ただし、そこでの植物プランクトンの増殖の可能性もある。
粉末活性炭注入	<ul style="list-style-type: none"> ・油臭や微量有機化学物質等の通常の緩速ろ過処理では除去しきれない物質が水源水質事故により混入した場合、一時的に原水に粉末活性炭を注入して対処する。生物ろ過膜上に粉末活性炭が蓄積するので、長期間の使用は難しい。

1. 新たな水質リスクへの対応

- Q II-1-① 緩速ろ過法が対応すべき水質リスクとは何か。
- Q II-1-② 新たな水質リスクにはどのようなものがあるか。
- Q II-1-③ 水質リスクをどのように評価するか。
- Q II-1-④ 水質リスクに関係する水質項目の重要度とは何か。
- Q II-1-⑤ リスク評価のため、物質の原水への混入可能性をどのように推定するか。
- Q II-1-⑥ リスク評価のため、浄水処理における除去又は付加をどのように推定するか。
- Q II-1-⑦ 水質リスクにどのように対応するか。

Q II-1-① 緩速ろ過法が対応すべき水質リスクとは何か。

A II-1-① 緩速ろ過法は、基本的には除濁及び消毒による浄水処理システムであるが、生物ろ過膜の浄化機能があることから、一部の溶存物質も除去できることが知られている。また、緩速ろ過の原水には多種多様な物質が含まれることがあり、緩速ろ過の浄化機能自体を阻害するもの、緩速ろ過の浄化機能を超えてしまうものが水質リスクとなる。また、浄水処理により付加されてしまうものもリスクとなる。これらのうち、浄化機能を阻害するもの及び浄水処理により付加されるものは継続的な緩速ろ過の課題であり、緩速ろ過の浄化機能を超えてしまうものに、新たな水質リスクが多い。

水質リスク	内容
浄化機能を阻害するもの	<ul style="list-style-type: none"> ・生物ろ過膜の好氣的な状態の維持を阻害するもの： 有機物負荷の増大、溶存酸素の減少、アンモニア態窒素や亜硝酸態窒素の増加等 ・損失水頭を上昇させるもの： 濁度負荷、藻類繁殖を増大させる栄養塩類
浄水処理により付加されるもの	<ul style="list-style-type: none"> ・生物ろ過膜の構成生物の漏出 小動物、ろ過膜藻類 ・消毒副生成物の生成
浄化機能を超えてしまうもの	<ul style="list-style-type: none"> ・溶存物質 微量有機化学物質、無機化学物質等

Q II-1-② 新たな水質リスクにはどのようなものがあるか。

A II-1-② 緩速ろ過は清冽な原水が得られる地域で使用されているためか、いわゆる化学物質による汚染の影響は少ないと考えられるが、それでも状況によっては特殊な汚染の

影響を受けている可能性もある。新たな水質リスクには、微量有機化学物質、無機化学物質、消毒副生成物及びその前駆物質、放射性物質等がある。その他、病原性微生物も対象となる。

Q II-1-③ 水質リスクをどのように評価するか。

A II-1-③ ある物質が、緩速ろ過での除去機能を超えて混入し、水道水の水質基準を遵守できないと重大な事態となる。事態の重篤度は、水道水が水質基準値を超える程度と、その項目が水道水の利用に与える影響（重要度）から判断される。さらに、リスクはこの重篤度と発生頻度の積で評価される。

水質基準を超える割合を知るには、原水濃度、浄水処理での除去率、浄水処理及び水道施設での付加量の情報が必要となる。原水濃度は、最大濃度とその発生頻度が原水への混入可能性として重要となる。水質基準値超過割合を数値化するには次の式を用いるが、厳密に計算することは必ずしも容易ではない。このため、水安全計画では、危害分析として、危害原因事象の影響程度（5段階）と発生頻度（5段階）のマトリックスを作成し、リスクレベルを5段階で評価している。

$$[\text{水質基準値超過割合}] = ([\text{原水濃度}] \times (1 - [\text{浄水処理での除去率}]) + [\text{浄水処理及び水道施設での付加量}]) / [\text{水質基準値}]$$

Q II-1-④ 水質リスクに関係する水質項目の重要度とは何か。

A II-1-④ 水道水の水質基準には、水質基準に関する省令で定められている水質基準項目と、厚生労働省の通知で示されている水質管理目標設定項目と要検討項目がある。このうち、水質基準項目は遵守義務があるため重要な項目で、健康影響に関連する31項目と生活上の支障に関連する20項目がある。さらに、健康影響に関連する項目のうち、一般細菌、大腸菌、水銀、シアンについては、1回の測定で給水停止が求められているので重要度が高い。

これらの項目に含まれていなくても、アンモニア態窒素等浄水処理プロセスに影響するものには、給水継続という点から重要な項目がある。

Q II-1-⑤ リスク評価のため、物質の原水への混入可能性をどのように推定するか。

A II-1-⑤ リスク評価のためには、原水の最大濃度とその発生頻度がどの程度になるか推定する必要がある。既に水源や原水の水質データがあるものについては、データ処理を行い、濃度分布、河川流量や水位等との関係、他の項目との相関関係などから推定する。

水質データのないものは、流域への負荷量の情報から、可能であれば流出率及び流達率を考慮して、原水濃度を推定する。負荷量の情報は、PRTR（化学物質排出移動量届出

制度)、農薬出荷量等を参考にす。PRTR 情報は個別の事業所からの点源排出移動量に加えて、非点源の排出量の推計もされている。

Q II-1-⑥ リスク評価のため、浄水処理における除去又は付加をどのように推定するか。

A II-1-⑥ 緩速ろ過は、生物ろ過膜の浄化機能による処理方法であるため、物質の除去率は、原水水質や処理施設の特性に大きく影響を受ける。このため、過去の水質データが蓄積されているものは、データ処理を行い、除去率を計算する。また、水源での負荷量が多いなど必要な物質については、パイロット実験を行って処理性を確認することも有用である。水質データのないもの、これまで原水で検出されていないものは、物質の特性から、除去率あるいは負荷量を推定することも可能である。(詳細は1.1及び1.2を参照)

浄水処理及び水道施設で付加されるものとしては、浄水薬品の主成分や不純物に起因するもの、資機材から溶出するもの、消毒副生成物等が考えられる。これらについては、過去の水質データから推定する。

Q II-1-⑦ 水質リスクにどのように対応するか。

A II-1-⑧ 水安全計画の手法に従い、リスクの高いものについて、監視方法及び管理目標を定める。監視方法は、代替指標を含めて、可能な限り連続測定等簡易な測定でデータが得られる手段を選択する。管理目標は、対処を実施するまでの時間も含め安全性を考慮して設定する。対応方法には、取水停止、粉末活性炭等緊急薬品の使用、ろ過速度の変更、ろ過停止などがあり、浄水場ごとにリスクの内容に応じてあらかじめ定めておく必要がある。また、浄水処理操作で対応できないリスクについては、前処理プロセスの導入等を検討する。

1.1 微量有機化学物質および無機化学物質

- Q II-1.1-① 緩速ろ過により微量有機化学物質は除去されるのか。
- Q II-1.1-② 微量有機化学物質の水道水質基準は、どのようなものか。
- Q II-1.1-③ 緩速ろ過で除去される又は減少する微量有機化学物質はどのようなものか。
- Q II-1.1-④ 緩速ろ過により無機化学物質は除去されるのか。
- Q II-1.1-⑤ 無機化学物質の水道水質基準は、どのようなものか。
- Q II-1.1-⑥ 緩速ろ過で除去される又は変化する無機化学物質はどのようなものか。

Q II-1.1-① 緩速ろ過により微量有機化学物質は除去されるのか。

A II-1.1-① 微量有機化学物質とは、土壌起源のフミン質等の主成分有機物とは異なり、水中に $\mu\text{g/L}$ レベル等の微量に存在する有機化学物質である。主に人為起源であるが藻類が産生するかび臭物質等天然のものも含まれる。緩速ろ過では、生物ろ過膜による懸濁態成分の粒子除去、溶存成分の付着と生物分解、大気中への揮散による有機化学物質の除去機能がある。緩速ろ過による個々の微量有機化学物質の除去効果は、原水の水質、前処理方法、生物分解に寄与する微生物、水温等の条件等に影響されるため、浄水場に特有のものとなることが多い。このため、蓄積された水質データの処理やパイロット実験で得られる情報から除去率を得るのが望ましいが、微量有機化学物質が極めて多種に亘っていることや原水の過去データが全て不検出など、必ずしも十分でないことも多い。そこで、物質の性質により除去可能性を推定することも行われている。

なお、個別の物質の情報があなくても、生物ろ過膜の複合的な除去機能により、多くの微量有機化学物質に対応できる可能性があり、これが防御装置（バリアー）としての緩速ろ過の利点となっている。

除去機構	有機化学物質の性質との関係												
粒子除去	<p>有機化学物質が水源で混入した後、粒子に吸着し原水中で懸濁物として含まれる程度は、疎水性の尺度であるオクタノール-水分配係数 Pow が目安となる。原水中の懸濁物は、粒子捕捉等の除濁機構により除去される。Pow を用いた有機化学物質の懸濁態の割合の推定例として、以下がある。</p> <table border="1" data-bbox="643 1599 1096 1818"> <thead> <tr> <th>logPow</th> <th>懸濁態割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>~3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>3~5</td> <td>0~5</td> </tr> <tr> <td>5~6</td> <td>5~30</td> </tr> <tr> <td>6~7</td> <td>30~80</td> </tr> <tr> <td>7~</td> <td>80~</td> </tr> </tbody> </table> <p>平衡状態で懸濁態となる割合は、Pow の他、水中の懸濁物質質量 (SS)、その有機物含有量 (OC_{ss}) に影響される。 $(0.41Pow \times SS \times OC_{ss}) / (1 + 0.41Pow \times SS \times OC_{ss})$ 上記の表は、$SS=10\text{mg/L}$、$OC_{ss}=0.1$ として計算している。</p>	logPow	懸濁態割合 (%)	~3	0	3~5	0~5	5~6	5~30	6~7	30~80	7~	80~
	logPow	懸濁態割合 (%)											
~3	0												
3~5	0~5												
5~6	5~30												
6~7	30~80												
7~	80~												

<p>溶存物質の付着</p>	<p>溶存状態で原水に含まれる有機化合物で、疎水性のものは生物ろ過膜および砂層の有機物に付着し易いので、それにより水中から除去される。生物ろ過膜及び砂層に付着により保持された有機化学物質は、生物分解性であればそこで生物分解を受ける。保持されることで、生物分解の反応時間が長くなるという利点がある。オクタノール-水分配係数を用いた有機化学物質のろ過層への移行割合の推定例として、以下がある。</p> <table border="1" data-bbox="654 582 1182 730"> <thead> <tr> <th>logPow</th> <th>ろ過層への移行割合(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>98</td> </tr> </tbody> </table> <p>平衡状態でろ過層へ移行する割合は、Pow の他、ろ過層の密度 (Den)、有機物含有量 (OCss)、間隙率(φ)に影響される。 $\frac{(1-\phi) \times 0.41Pow \times Den \times OCss}{(\phi + (1-\phi) \times 0.41Pow \times Den \times OCss)}$ 上記の表は、Den=2.0 g/cm³、OCss=0.2、φ=0.4 として計算している。ただし、この値は平衡状態に達した場合で、実際のろ過池においては平衡に達する前に流出するので、この1部が付着すると考えられ、その程度はろ過速度に影響される。</p>	logPow	ろ過層への移行割合(%)	1	30	2	80	3	98
logPow	ろ過層への移行割合(%)								
1	30								
2	80								
3	98								
<p>生物分解</p>	<p>生物分解は、対象化学物質の分解に寄与する微生物が生物ろ過膜に存在することで起こるため、微生物の馴養が必要となる。このため、比較的長期間暴露されている物質の除去率は高くなるが、人工の有機化学物質などの突発的な汚染の場合生物分解は起こり難い。微量有機化学物質の生物分解による濃度変化は、濃度の一次式に従うことが知られている。</p> $C_t = C_0 \exp(-kmt)$ <p> C_t : 時間 t における微量有機化学物質の濃度 C₀ : 初期の微量有機化学物質の濃度 k : 反応速度定数 (微量有機化学物質、水温により異なる) m : 生物分解に寄与する微生物濃度 t : 接触時間 </p> <p>微量有機化学物質ごとの k 値の情報は容易に得られるわけではないので、生物分解性の有無や表流水中における生物分解半減期 T_{1/2} (= ln2/km) のデータを参考にする。緩速ろ過池ではろ過池水から砂層を含めて半日程度の滞留時間があるので、半減期が時間単位のものも減少が期待できる。また、付着により生物ろ過膜に保持され易いものは、半減期が長くても除去される可能性がある。</p>								
<p>大気中への揮散</p>	<p>揮発性の有機化合物が原水中に混入した場合、ろ過池水から大気中への揮散により減少する可能性がある。揮散の速度定数 kwa は、ヘンリー定数 He により、以下の式で計算される。</p> $kwa = 1 / (1 / (U1 \times He / RT) + 1 / U2) / Dw$ <p> U1 : 大気-水境界面の大気側の物質移動係数 U2 : 大気-水境界面の水側の物質移動係数 R : 気体定数 T : 絶対温度 Dw : 水深 </p>								

また、半減期 $T_{1/2}$ は、 $T_{1/2} = \ln 2 / k_{wa}$ で計算できる。
 例として U_1 が 3m/hr、 U_2 が 0.03m/hr、水温 20℃、水深 0.5 m のモデルでの半減期は次のようになる。

ヘンリー定数 : Pa·m ³ /mol (25℃)	半減期 : hr
1000	12
100	14
10	40

微量有機化学物質のオクタノール-水分配係数、生物分解性の有無（半減期）、ヘンリー定数は、「化学物質の初期リスク評価書」（独立行政法人 製品評価技術基盤機構）等を参考にすることができ、これらにより緩速ろ過による除去可能性を推定する。

Q II-1.1-② 微量有機化学物質の水道水質基準は、どのようなものか。

A II-1.1-② 水道の水質基準に含まれる微量有機化学物質は以下の通りである。

分類	種類	項目	基準値等 (mg/L)	分類	種類	項目	基準値等 (mg/L)	
水質基準項目	工業用化学薬品	四塩化炭素	0.002	要検討項目		1,2,3-トリクロロベンゼン	0.02	
		1,4-ジオキサン	0.05			ニトリロ三酢酸(NTA)	0.2	
		シス-1,2-ジクロロエチレン及びトランス-1,2-ジクロロエチレン	0.04		藻類	ミクロキスチン-LR	0.0008(暫定)	
		ジクロロメタン	0.02		水道用資機材・浄水薬品	アクリルアミド	0.0005	
		テトラクロロエチレン	0.01			アクリル酸	-	
		トリクロロエチレン	0.01			エチレンジアミン四酢酸(EDTA)	0.5	
		ベンゼン	0.01			エピクロロヒドリン	0.0004(暫定)	
		フェノール類	0.005			塩化ビニル	0.002	
		洗剤	陰イオン界面活性剤			0.2	酢酸ビニル	-
	非イオン界面活性剤		0.02			2,4-ジアミノトルエン	-	
	藻産類生		ジェオスミン			0.00001	2,6-ジアミノトルエン	-
		2-メチルイソボルネオール	0.00001			N,N-ジメチルアニリン	-	
	水質設定項目目標	工業用化学薬品	1,2-ジクロロエタン			0.004	スチレン	0.02
			トルエン			0.4	トリエチレントトラミン	-
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル			0.08			ヒドラジン	-	
1,1,1-トリクロロエタン			0.3			1,2-ブタジエン	-	
メチル-n-ブチルエーテル			0.02		1,3-ブタジエン	-		
1,1-ジクロロエチレン			0.1		内分 泌 攪 乱	17-β-エストラジオール	0.00008(暫定)	
フタル酸ジ-n-ブチル			0.01			エチニル-エストラジオール	0.00002(暫定)	
フタル酸ブチルベンジル			0.5(暫定)			ノニルフェノール	0.3(暫定)	
有機すず化合物	0.0006(暫定)	ビスフェノール A	0.1(暫定)					
要検討項目	工業用化学薬品	キシレン	0.4		その他	ダイオキシン類(pgTEQ/L)	1(暫定)	
		パーフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)	-					
		パーフルオロオクタンスルホン酸(PFOA)	-					
		アニリン	0.02					
		キノリン	0.0001					

Ⅱ 新たな課題対応

新たな水質リスクへの対応

分類	種類	項目	基準値等 (mg/L)	分類	種類	項目	基準値等 (mg/L)
水質管理目標設定項目	農薬類	1, 3-ジクロロプロペン (D-D)	0.05	水質管理目標設定項目	農薬類	チアジニル	0.1
		2,2-DPA (ダラボン)	0.08			チウラム	0.02
		2,4-D (2,4-PA)	0.03			チオジカルブ	0.08
		EPN	0.004			チオフエネートメチル	0.3
		MCPA	0.005			チオベンカルブ	0.02
		アシュラム	0.9			テルブカルブ (MBPMC)	0.02
		アセフェート	0.006			トリクロピル	0.006
		アトラジン	0.01			トリクロルホン (DEP)	0.005
		アニロホス	0.003			トリシクラゾール	0.1
		アミトラズ	0.006			トリフルラリン	0.06
		アラクロール	0.03			ナプロバミド	0.03
		イソキサチオン	0.008			バラコート	0.005
		イソフェンホス	0.001			ビペロホス	0.0009
		イソプロカルブ (MIPC)	0.01			ピラクロニル	0.01
		イソプロチオラン (IPT)	0.3			ピラゾキシフェン	0.004
		イプロベンホス (IBP)	0.09			ピラゾリネート (ピラゾレート)	0.02
		イミノクタジン	0.006			ピリダフェンチオン	0.002
		インダノファン	0.009			ピリブチカルブ	0.02
		エスプロカルブ	0.03			ピロキロン	0.04
		エディフェンホス (EDDP)	0.006			フィプロニル	0.0005
		エトフェンブロックス	0.08			フェニトロチオン (MEP)	0.01
		エトリジアゾール (エクロメゾール)	0.004			フェノブカルブ (BPMC)	0.03
		エンドスルフアン (ペンゾエピン)	0.01			フェリムゾン	0.05
		オキサジクロメホン	0.02			フェンチオン (MPP)	0.006
		オキシ銅 (有機銅)	0.03			フェントエート (PAP)	0.007
		オリサストロビン	0.1			フェントラザミド	0.01
		カズサホス	0.0006			フサライド	0.1
		カフェンストロール	0.008			ブタクロール	0.03
		カルタップ	0.3			ブタミホス	0.02
		カルバリル (NAC)	0.05			ブプロフェジン	0.02
		カルプロバミド	0.04			フルアジナム	0.03
		カルボフラン	0.005			プレチラクロール	0.05
		キノクラミン (ACN)	0.005			プロシミドン	0.09
		キャブタン	0.3			プロチオホス	0.004
		クミルロン	0.03			プロビコナゾール	0.05
		グリホサート	2			プロピザミド	0.05
		グルホシネート	0.02			プロベナゾール	0.05
		クロメブロップ	0.02			プロモブチド	0.1
		クロルニトロフェン (CNP)	0.0001			ベノミル	0.02
		クロルピリホス	0.003			ペンシクロン	0.1
		クロロタロニル (TPN)	0.05			ベンゾビスクロン	0.09
		シアナジン	0.004			ベンゾフェナップ	0.004
		シアノホス (CYAP)	0.003			ベンタゾン	0.2
		ジウロン (DCMU)	0.02			ペンディメタリン	0.3
		ジクロベニル (DBN)	0.03			ベンフラカルブ	0.04
		ジクロルボス (DDVP)	0.008			ベンフルラリン (ベスロジン)	0.01
		ジクワット	0.005			ベンフレセート	0.07
		ジスルホトン (エチルチオメトン)	0.004			ホスチアゼート	0.003
		ジチアノン	0.03			マラチオン (マラソン)	0.7
		ジチオカルバメート系農薬	0.005			メコブロップ (MCP)	0.05
		ジチオビル	0.009			メソミル	0.03
		シハロホップブチル	0.006			メタム (カーバム)	0.01
		シマジン (CAT)	0.003			メタラキシル	0.06
		ジメタメトリン	0.02			メチダチオン (DMTP)	0.004
ジメトエート	0.05	メチルダイムロン	0.03				
シメトリン	0.03	メミノストロビン	0.04				
ジメピベート	0.003	メトリブジン	0.03				
ダイアジン	0.003	メフェナセツト	0.02				
ダイムロン	0.8	メプロニル	0.1				
ダゾメット	0.006	モリネート	0.005				

なお、医薬品類については、基準は設定されていない。

Q II-1.1-③ 緩速ろ過で除去される又は減少する微量有機化学物質はどのようなものがあるか。

A II-1.1-③ 物質情報から緩速ろ過により除去される又は減少する可能性のある物質の例とその除去機構は以下の通りである。

除去機構	除去される又は減少する可能性のある有機化学物質の例
粒子除去 溶存物質の付着 (logPow)	<ul style="list-style-type: none"> 工業用化学薬品 (フタル酸ジ-2-エチルヘキシル;4.89、フタル酸ジ-n-ブチル;4.9、フタル酸ブチルベンジル;4.77) ダイオキシン類 (2,3,7,8-TCDD;6.07、OCDD;7.08) 内分泌攪乱化学物質 (ノニルフェノール;5.76) 農薬類 (EPN;5.02、アミトラズ;5.50、エスプロカルブ;4.60、エトフェンプロックス;6.90、クロルピリホス;4.70、トリフルラリン;5.07、ピリブチカルブ;5.18、ブタミホス;4.62、プロプロフェジン;4.80、プロチオホス;5.67、ベンゾフェナップ4.69、ペンデイメタリン;5.18)
生物分解	<ul style="list-style-type: none"> 藻類産生物質 (ジェオスミン、2-メチルイソボルネオール、マイクロキスチン) 内分泌かく乱化学物質 (エチニルエストラジオール、17β-エストラジオール、ビスフェノールAなど) 工業用化学薬品 (フェノール、プロモフェノールなど) 農薬類 (モリネート、2,4-Dなど) 医薬品 (ジクロフェナク、ナプロキセン、イブプロフェンなど) 洗剤 (陰イオン界面活性剤、非イオン界面活性剤)
大気中への揮散 (ヘンリー定数: Pa・m ³ /mol, 25℃)	<ul style="list-style-type: none"> 工業用化学薬品 (四塩化炭素;2800、ジクロロメタン;329、トリクロロエチレン;998、テトラクロロエチレン;1790、ベンゼン;562、トルエン;673、1,1,1-トリクロロエタン;998、1,1-ジクロロエチレン;2640、キシレン;524~727) 農薬類 (1,3-ジクロロプロペン;2480)

Q II-1.2-① 緩速ろ過により無機化学物質は除去されるのか。

A II-1.2-① 無機化学物質には、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウム、重炭酸イオン、塩化物イオン、硫酸イオン、溶性ケイ酸などの溶存主成分の他、微量の無機イオンや重金属が含まれる。また、粘土やシルトなどケイ酸塩構造に含まれる懸濁態成分もある。緩速ろ過では、粒子除去、付着、生物酸化、水酸化物形成による無機化学物質の除去機能がある他、ろ過膜藻類の光合成に起因する日周変動が起こる物質がある。また、変化の起きない物質もある。

除去効果については、蓄積された水質データの処理やパイロット実験で得られた値の情報から得るのが望ましいが、データ等が十分でない場合は、物質の性質により除去可

能性を推定することも行われている。また、有機化学物質と同様に、無機化学物質についても、緩速ろ過については防御装置（バリアー）としての機能がある。

QⅡ-1.2-② 無機化学物質の水道水質基準は、どのようなものか。

AⅡ-1.2-② 水道の水質基準に含まれる無機化学物質は以下の通りである。

分類	種類	項目	基準値等 (mg/L)
水質基準項目	重金属	カドミウム及びその化合物	0.003
		水銀及びその化合物	0.0005
		セレン及びその化合物	0.01
		鉛及びその化合物	0.02
		ヒ素及びその化合物	0.01
		六価クロム化合物	0.05
		亜鉛及びその化合物	1.0
		アルミニウム及びその化合物	0.2
		鉄及びその化合物	0.3
		銅及びその化合物	1.0
		マンガン及びその化合物	0.05
	無機イオン	亜硝酸態窒素	0.004
		シアン化物イオン及び塩化シアン	0.01
		硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	10
		フッ素及びその化合物	0.08
		ホウ素及びその化合物	1.0
		ナトリウム及びその化合物	200
		塩化物イオン	200
		カルシウム、マグネシウム等（硬度）	300
水質管理目標 設定項目	重金属	アンチモン及びその化合物	0.02
		ウラン及びその化合物	0.002
		ニッケル及びその化合物	0.02
要検討項目	重金属	銀及びその化合物	-
		バリウム及びその化合物	0.7
		ビスマス及びその化合物	-
		モリブデン及びその化合物	0.07
	無機イオン	過塩素酸	0.025

QⅡ-1.2-③ 緩速ろ過で除去される又は変化する無機化学物質はどのようなものか。

AⅡ-1.2-③ 物質の特性から緩速ろ過により除去される又は変化する可能性のある物質とその除去機構は以下の通りである。

除去機構	除去される又は変化する可能性のある無機化学物質の例
粒子除去	<ul style="list-style-type: none"> ・原水中の粒子に含まれる成分は粒子捕捉等の除去機構で除去される。 (シルト、粘土の構成成分の例：ケイ酸、ナトリウム、カリウム) ・粘土粒子への付着や不溶性炭酸塩の形成により、原水で懸濁態となり易い物質は、粒子の除去機構で除去される可能性がある。 (粘土粒子への付着の例：水銀、不溶性炭酸塩の形成の例：鉛)
溶存物質の付着	<ul style="list-style-type: none"> ・フミン質等有機物とのキレート錯体及び微細なコロイドを形成する物質は、付着により減少する。 (有機物とのキレート錯体の例：鉄、微細なコロイドを形成する例：アルミニウム)
生物酸化	<ul style="list-style-type: none"> ・還元イオン状態のものが、生物酸化により不溶性となり除去される。 (例：マンガン、鉄) ・硝化により、アンモニア態窒素と亜硝酸態窒素が酸化され、硝酸態窒素となる。
水酸化物形成	<ul style="list-style-type: none"> ・重金属のうち、負のオキソ酸イオンを作るものは、除去されにくい。 (例：ヒ素、六価クロム、モリブデン、セレン) ・両性金属は、pH 値の変動を大きく受ける。 (例：亜鉛、アルミニウム) ・不溶性水酸化物を形成するものは、藻類の光合成による pH 値上昇がある場合、不溶性となり除去される。 (例：銅)
光合成に起因する日周変動	<ul style="list-style-type: none"> ・栄養塩として藻類に取り込まれる物質 (例：硝酸態窒素、リン酸、ケイ素) ・炭酸塩の沈殿で起こる物質 (例：カルシウム、マグネシウム、ストロンチウム、バリウム、重炭酸イオン)

この他、アルカリ金属の陽イオン類(ナトリウム、カリウム、リチウム)、陰イオン類(塩化物イオン、硫酸イオン、フッ化物イオン、臭化物イオン、塩素酸、臭素酸)は、ろ過砂など資機材からの溶出がない限り、ほとんど変化しない。

1.2 消毒副生成物、病原微生物、放射性物質等

- Q II-1.2-① 消毒副生成物及び消毒副生成物前駆物質とは何か。
- Q II-1.2-② 消毒副生成物の水質基準とは何か。
- Q II-1.2-③ 緩速ろ過で消毒副生成物前駆物質は除去されるのか。
- Q II-1.2-④ 水道水質に関係する病原体とは何か。
- Q II-1.2-⑤ 病原微生物の水道水質基準は、どのようなものか。
- Q II-1.2-⑥ 緩速ろ過で病原体は除去されるのか。
- Q II-1.2-⑦ 緩速ろ過でどの程度の病原体の除去率が必要となるか。
- Q II-1.2-⑧ 水道水質に関係する放射性物質とは何か。
- Q II-1.2-⑨ 放射性物質の水道水質基準とは何か。
- Q II-1.2-⑩ 緩速ろ過で放射性物質は除去されるのか。
- Q II-1.2-⑪ 緩速ろ過でPM2.5は除去されるのか。

Q II-1.2-① 消毒副生成物及び消毒副生成物前駆物質とは何か。

A II-1.2-① 消毒副生成物とは、浄水処理で行われる消毒により生成される物質で、健康影響のあるものを対象としている。消毒剤と消毒副生成物の前駆物質が反応して消毒副生成物が作られる。代表的な消毒副生成物であるトリハロメタン類は、フミン質や藻体構成物質などの有機物質と消毒剤の塩素が反応して生成し、臭素が付加した消毒副生成物は、これらに加えて水中の臭化物イオンが反応に関与して生成する。生成量は、有機物濃度、塩素消費量、pH値、水温、反応時間の影響を受け、これらの値が大きいほど生成量が多くなる。このため、トリハロメタン濃度は、浄水場の浄水より末端給水栓水の方が高くなる傾向がある。また、塩素注入の前に消毒副生成物前駆物質を低減化することと、塩素注入率を可能な限り低減化することが重要である。

消毒剤としては、主として塩素消毒であるが、その他オゾンや二酸化塩素も含まれる。オゾンの消毒副生成物としてはホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、臭素酸やN-ニトロジメチルアミン (NDMA)、二酸化塩素の消毒副生成物としては塩素酸や亜塩素酸がある。

Q II-1.2-② 消毒副生成物の水質基準とは何か。

A II-1.2-② 水道の水質基準に含まれる消毒副生成物は以下の通りである。

種類	分類	項目	基準値等 (mg/L)
水質基準項目	トリハロメタン類	クロロホルム	0.06
		ジブロモクロロメタン	0.1
		プロモジクロロメタン	0.03
		ブロモホルム	0.09
		総トリハロメタン	0.1

水質基準項目	ハロ酢酸類	クロロ酢酸	0.02
		ジクロロ酢酸	0.03
		トリクロロ酢酸	0.03
	その他の有機物質	ホルムアルデヒド	0.08
		シアン化物イオン及び塩化シアン	0.01
	無機物質	塩素酸	0.6
臭素酸		0.01	
水質管理目標 設定項目	ハロアセトニトリル類	ジクロロアセトニトリル	0.01 (暫定)
	その他の有機物質	抱水クロラール	0.02 (暫定)
	無機物質	亜塩素酸	0.6
二酸化塩素		0.6	
要検討項目	ハロ酢酸類	ブロモクロロ酢酸	-
		ブロモジクロロ酢酸	-
		ジブロモクロロ酢酸	-
		ブロモ酢酸	-
		ジブロモ酢酸	-
		トリブロモ酢酸	-
	ハロアセトニトリル類	トリクロロアセトニトリル	-
		ブロモクロロアセトニトリル	-
		ジブロモアセトニトリル	0.06
	その他の有機物質	アセトアルデヒド	-
		MX	0.001
		N-ニトロソジメチルアミン (NDMA)	0.0001

消毒副生成物前駆物質には水質基準は設定されていない。しかし、トリハロメタン生成能 (THMFP) が前駆物質の指標として測定されることがある。また、全有機炭素 (TOC) や紫外吸光度 (UV254nm) が、原水や処理過程の前駆物質の動向を知るために測定されることもある。

平成 24 年 5 月に、利根川水系にヘキサメチレンテトラミンが流出し、浄水場での塩素消毒によりホルムアルデヒドが生成したことにより発生した断水を伴う事態を契機として、関連する物質の情報が整理された。これらは、「浄水処理対応困難物質」として、下表の物質がリストアップされている。これらの物質は、有機化合物については、オクタノール水分配係数やヘンリー定数が小さく除濁過程や水中からの揮散で減少しにくいいため、通常の浄水処理では低減化が難しいものである。無機物質の臭化物も浄水処理では低減化が難しい。このため、これらについて、事故時の迅速な対応とともにリスクの把握が求められる。

物質	生成する水質基準等物質
ヘキサメチレンテトラミン	ホルムアルデヒド (塩素処理により生成)
1,1-ジメチルヒドラジン	
N,N-ジメチルアニリン	
トリメチルアミン	
テトラメチルエチレンジアミン	
N,N-ジメチルエチルアミン	
ジメチルアミノエタノール	

アセトンジカルボン酸	クロロホルム (塩素処理により生成)
1,3-ジヒドロキシベンゼン (レゾルシノール)	
1,3,5-トリヒドロキシベンゼン	
アセチルアセトン	
2'-アミノアセトフェノン	
3'-アミノアセトフェノン	臭素酸 (オゾン処理により生成)、 ジプロモクロロメタン、プロモジ クロロメタン、プロモホルム (塩 素処理により生成)
臭化物 (臭化カリウム等)	

Q II-1.2-③ 緩速ろ過で消毒副生成物前駆物質は除去されるのか。

A II-1.2-③ 消毒副生成物前駆物質の有機物質のうち、懸濁態のものは緩速ろ過の除濁プロセスにより除去される。溶存態で、藻体構成物質のような生物分解性のものも生物ろ過膜で除去される。その他、フミン質のような非分解性のものも、一部が生物ろ過膜及び砂層への付着により減少する。このため、除去率は原水中の有機物質の組成に影響され、生分解性有機物質の割合が大きい場合には、緩速ろ過による消毒副生成物の低減化効果が大きくなる。

「浄水処理対応困難物質」のうち、ヘキサメチレンテトラミンは環境中で加水分解又は生物分解で減少するとされているが、半減時間が100日オーダーと長く、緩速ろ過での低減化は期待できない。ただし、加水分解生成物のアンモニアとホルムアルデヒドは、硝化反応及び微生物分解による低減化が可能である。

Q II-1.2-④ 水道水質に関係する病原体とは何か。

A II-1.2-④ 水道水の安全性に係る病原体として、細菌、ウイルス、原虫があり、これらが水道水への水質リスクとなる。飲料水を介して伝播する可能性のある病原微生物には数多くの種類があり、それらの伝搬の経路と感染（飲用により胃腸へ感染、エアロゾルの吸入により呼吸器へ感染、入浴等の接触により皮膚、粘膜、傷、目への感染）、水供給過程での生残性、塩素消毒への抵抗力、感染力と病気の重篤度は様々である。これらを評価するために、参照病原体が選定されている。例えば、細菌は大腸菌やカンピロバクター、ウイルスはロタウイルスやエンテロウイルス、原虫はクリプトスポリジウムやジアルジアがそれである。これらにより、定量的微生物リスク評価を行い、障害調整生存年数 (DALY) 指標を用いて、浄水処理性能上の目標の決定や水質改善効果の評価に活用されている。

また、個々の病原体の水中の存在量を測定することは難しいので、監視や運転管理の目的には指標が用いられている。例えば、大腸菌、大腸菌群、従属栄養細菌、嫌気性芽胞菌などの細菌、大腸菌ファージや腸管ウイルスのようなウイルスで、これらは必ずしも病原性があるものではないが、検査方法が容易であること、消毒剤への応答に代表性があるなどの利点がある。

Q II-1.2-⑤ 病原微生物の水道水質基準は、どのようなものか。

A II-1.2-⑤ 水質基準には、指標微生物が用いられる。日本の水質基準では、水質基準項目に大腸菌（基準値：検出されないこと）及び一般細菌（基準値：100 個/mL 以下）が定められている。これらは、糞便汚染の指標及び消毒効果の指標である。また、水質管理目標項目には従属栄養細菌（目標値：2000 個/mL 以下）があり、消毒効果及び配水施設の清浄度の指標とされている。さらに、クリプトスポリジウム等対策では、原水の汚染の指標として、大腸菌と嫌気性芽胞菌が用いられ、検出された場合クリプトスポリジウム等による汚染のおそれがあるとされ、ろ過設備や紫外線処理設備の予防対策が求められる。

WHO 飲料水水質ガイドラインでは、大腸菌または糞便性大腸菌群が 100mL 中に検出してはならないこととされている。アメリカ合衆国 USEPA の飲料水水質基準では、第 1 種飲料水規則の最大許容濃度 (MCL) として、クリプトスポリジウム（原水存在量に応じた除去率、例えば 3 個/L で 99.7%）、ジアルジア（除去/不活性化率 99.9%）、従属栄養細菌（500 個/mL 以下）、レジオネラ、大腸菌群：糞便性大腸菌群及び大腸菌を含む（大腸菌群の陽性試料の割合が月間 5% 以下）、腸管ウイルス（除去/不活性化率 99.99%）について、それぞれ（ ）で示した処理技術要件が定められている。

Q II-1.2-⑥ 緩速ろ過で病原体は除去されるのか。

A II-1.2-⑥ 緩速ろ過法では、ろ過及び消毒により除去又は不活性化される。

ろ過では、生物ろ過膜への吸着を含む捕捉と原生動物等の摂食により除去される。WHO 飲料水水質ガイドラインでは、生物膜の形成の有無、ろ過砂の粒径、流量、運転条件（主に、温度、pH 値）によるが、以下のような除去率が示されている。

病原体	最小除去率	最大除去率
細菌	2 log (99%)	6 log (99.999%)
ウイルス	0.25 log (44%)	4 log (99.99%)
原虫	0.3 log (50%)	> 5 log (99.999%)

また、塩素消毒による 99% 不活性化のための Ct 値（遊離残留塩素濃度と接触時間の積：mg/L・min）は以下の通りである。

病原体	Ct 値 (99%)
細菌	0.04~0.08 (5°C、pH6~7)
ウイルス	2~30 (0~10°C、pH7~9)
原虫	ジアルジア：25~245 (0~25°C、pH7~8) クリプトスポリジウム：1,600 (20°C、pH 7.0)

他の消毒方法による Ct 値、消毒効果は以下の通りである。オゾンは塩素より消毒効果が高い。また、一般的に、ウイルスは細菌より耐性がある。Ct 値は温度の影響を受け、クリプトスポリジウムは特に温度により大きく異なる。紫外線照射の効果は、濁質や溶存物質の量、照射強度、曝露時間、紫外線の波長及び照射量に影響される。

病原体	二酸化塩素 (Ct 値)	オゾン (Ct 値)	紫外線照射 (99%)
細菌	0.03~0.3 (15-25°C、pH6.5-7)	0.02	0.65~230 mJ/cm ²
ウイルス	2~30 (0-10°C、pH7-9)	0.006~0.2	7~186 mJ/cm ²
原虫	100	0.5~40	<1~60 mJ/cm ²

Q II-1.2-⑦ 緩速ろ過でどの程度の病原体の除去率が必要となるか。

A II-1.2-⑦ 水質基準値による評価とは別に、定量的微生物リスク評価により除去率を評価することもできる。このリスク評価では、曝露、用量-反応関係、発生頻度、疾病の重篤度から、指標として障害調整生存年数 (DALY) を求め、その値が1人当たり年間 10⁻⁶ DALY となるように、原水濃度に応じた目標除去率を求めるものである。

厚生科学審議会生活環境部会水質管理専門委員会報告「水質基準の見直し等について」(平成15年4月28日)によれば、原水中のクリプトスポリジウムが1個/10Lの場合、ろ過による除去率は2log(99%)の必要がある。クリプトスポリジウムの場合は、塩素消毒に対するCt値が高く、通常の塩素消毒の濃度(～1mg/L)及び摂取されるまでの最小接触時間(～1hr)では不活性化効果がなく、ろ過による除去が必要である。

一方、細菌やウイルスは残留塩素による不活性化効果が期待できる。給水栓水で残留塩素を維持することは、これらによるリスクを低減化することに繋がる。

Q II-1.2-⑧ 水道水質に関係する放射性物質とは何か。

A II-1.2-⑧ 水道水源を含む環境中に存在する可能性のある放射性物質としては、自然起源と人為起源のものがある。例えば、カリウム-40など自然起源のものは、土壌粒子や水中に溶存した状態で存在する。セシウム-137など人工の放射性物質は、原子力発電所の事故等で環境中に拡散したものである。

WHO飲料水水質ガイドラインでは、健康影響のないレベルとして年間線量が0.1ミリシーベルト(mSv)以下という個人線量基準が設定されている。これは、世界の平均年間線量が約3mSvで、このうち80%(2.4mSv)がラドンなど自然起源のもの、19.6%(0.4mSv)が医療診断のための放射線の利用によるものであることから、飲料水中の放射性物質については低いレベルとされている。これを基に、全α線0.5ベクレル(Bq)/L及び全β線1Bq/Lがスクリーニングレベルとして定められている。この際、カリウムは溶存主成分として飲料水に含まれていることが多いため、全β線からカリウム-40の影響を除く操作(カリウム1g当り27.9Bq)も行われる。

スクリーニングレベルを超過した場合には、原因となる放射性核種を同定し、個々の放射性物質濃度を測定する必要がある。測定結果をガイダンスレベルと比較し、必要に応じて飲用制限等の対応を実施する。ガイダンスレベルは、1年間毎日2L摂取した場合の実効線量が0.1mSv/年となる放射性核種の濃度である。複数が影響する場合、個々の放射性物質濃度をそれぞれのガイダンスレベルで除したものを総和して判断する必要

がある。

Q II-1.2-⑨ 放射性物質の水道水質基準とは何か。

A II-1.2-⑨ 日本においては、水質基準に放射性物質は含まれていない。

2011年3月11日の福島第一原子力発電所の事故により、放射性ヨウ素、放射性セシウムが広く環境中に拡散したため、2011年3月19日放射性ヨウ素 300Bq/kg（乳児 100Bq/kg）、放射性セシウム 200Bq/kg の指標値が通知により示された。その後、2012年3月5日に放射性セシウム（セシウム-134 及びセシウム-137）の管理目標値として、10Bq/kg が通知で示され、4月1日より施行されている。放射性ヨウ素（ヨウ素-131）は半減期が8日で既に環境中に存在しないこと、ウランは放出量が極めて少ないこと、ストロンチウム-90 は検査が容易でないこととセシウム-137 との存在比から放射性セシウムの管理目標値に包含できることから、放射性セシウム（半減期は、セシウム-134：2年、セシウム-137：30年）についてのみ管理目標値が設定された。なお、10Bq/kg はWHO飲料水水質ガイドラインのガイダンスレベルに相当する。福島第一原子力発電所の事故以降、個別の核種が測定できるゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー装置が広く設置されたため、スクリーニングを経ずして個別の放射性核種のセシウム-134 とセシウム-137 の目標値が設定された。また、この管理目標値を超過した場合の対応として、セシウムがろ過操作により除去されることから、直ちに給水停止するのではなく、浄水処理の復旧、他水源への振替、摂取制限等の措置が求められる。

WHO飲料水水質ガイドラインでは、全 α 線 0.5Bq/L 及び全 β 線 1Bq/L のスクリーニングレベルと、各放射性核種のガイダンスレベルが示されている。アメリカ合衆国USEPAの飲料水水質基準では、第1種飲料水規則のMCLとして、 α 粒子（15pCi/L、0.555Bq/L に相当）、 β 粒子及び光子放射物質（4mrem/年、0.04mSv/年に相当）、ラジウム-226 及びラジウム-228（5pCi/L、0.189Bq/L に相当）、ウラン（30 μ g/L）が設定されている。ヨーロッパ連合の飲料水指令では、トリチウム（100Bq/L）、全放射性物質暴露量（0.1mSv/年）が示されている。

Q II-1.2-⑩ 緩速ろ過で放射性物質は除去されるのか。

A II-1.2-⑩ 放射性物質の除去は、その化学的形態に影響される。

管理目標値が設定されている放射性セシウムは粒子に吸着され易く、環境水中ではほとんどが懸濁態で存在し、一部が陽イオンとして溶存している。緩速ろ過では、粒子捕捉により懸濁態が、付着により溶存態の一部が除去されるので、濁度管理を適切に行えばほとんどが除去される。

放射性ヨウ素は、環境水中では、粒子状ヨウ素、有機態ヨウ素又はヨウ化物イオンの形で存在すると考えられる。このうち、粒子状ヨウ素はろ過により除去され、有機態ヨウ素は一部が付着により除去されるが、ヨウ化物イオンの除去は難しい。このため、原

水中の存在形態にもよるが、放射性ヨウ素が水道水中に残存する可能性は高い。また、水道水中の残留塩素によりヨウ素酸イオンとなり、これらは家庭用浄水器でも除去されにくい。

Q Ⅱ-1.2-⑩ 緩速ろ過でPM2.5は除去されるのか。

A Ⅱ-1.2-⑩ PM2.5とは、大気中に浮遊している $2.5\mu\text{m}$ 以下の小さな粒子で、非常に小さいため、吸入すると肺の奥深くまで入り易く、呼吸器系への影響に加え循環器系への影響が心配されている。PM2.5の原因として、物の燃焼などによって直接排出されるものと、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)、揮発性有機化合物(VOC)等のガス状大気汚染物質が、主として環境大気中での化学反応により粒子化したものがある。

表流水(川、ダム湖、湖)を水源としている浄水場では、降雨等に含まれるPM2.5が原水に混入することがあるが、このような $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子は、粘土粒子等元来原水に多く含まれており、緩速ろ過による粒子捕捉で除くことができるものである。このため、濁度管理(ろ過水濁度0.1度以下を維持)が適切であれば問題はない。また、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)も、たとえ原水に溶け込んでも、原水中に本来含まれている量に比べれば少なく問題はない。揮発性有機化合物(VOC)は、水中には溶け込みにくい。これらについては、水質基準の検査結果(硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素、ジクロロメタン、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、ベンゼン、クロロホルム等)に異常がないことで確認できる。

2. 緩速ろ過の特徴

Q II-2-① 緩速ろ過の特徴とは何か。

Q II-2-② 生物処理の特徴は何か。

Q II-2-③ 中小施設で持続可能な浄水処理方法である理由は何か。

Q II-2-① 緩速ろ過の特徴とは何か。

A II-2-① 緩速ろ過は、砂層表面に自然に形成される生物ろ過膜による浄化機能を活用する浄水処理プロセスである。物理化学的な粒子除去に加えて、生物ろ過膜による生物処理の効果がある。また、簡易な浄水処理方法であることから、地方や発展途上のコミュニティの中小施設で持続可能な浄水処理方法となっている。

Q II-2-② 生物処理の特徴は何か。

A II-2-② 生物ろ過膜では、粒子の捕捉に加えて溶存物質の付着や生物分解による低減化効果がある。特に、多種の微量化学物質への対応可能性があり、特定できない汚染に対するバリアーとなる。また、病原微生物に対して、生物ろ過膜の生物群の摂食による不活性化も起こる。

ただし、これらの生物処理効果が発現するためには、生物ろ過膜が形成され好気的な状態に保たれる必要があり、それらを考慮した運転が求められる。また、生物ろ過膜での生物分解は、原水の水質、前処理、関与する微生物の馴養、水温等の環境条件に影響されるため、処理効果は浄水場に特有のものになり、一般的な定量化は難しい。

Q II-2-③ 中小施設で持続可能な浄水処理方法である理由は何か。

A II-2-③ 緩速ろ過池は、比較的簡単な構造であり、浄水場の規模に応じてろ過池の大きさを幅広く選択できる。ろ過面積では、小規模なものは50m²から大規模なもので5000m²までである。また、河川で起こる現象を利用した簡易な浄水処理方法であり、急速ろ過法のように凝集剤の注入を必須としていないため、ろ過砂など現地で調達できる資機材で建設可能である。このことは、災害時等の施設故障後に比較的早く回復できる要因にもなっている。さらに、通常は、必ずしも運転管理に専門的な要員は求められない。これらの理由から、緩速ろ過は、地方や発展途上のコミュニティの中小施設で持続可能な浄水処理方法となっている。

緩速ろ過の概要

緩速ろ過は、ろ過速度が通常のろ過よりも遅く、ろ過層の厚さが厚い（通常、1.5～2.0m）ため、ろ過速度が遅い。このため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。

緩速ろ過の特徴として、ろ過速度が遅いため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。また、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。

緩速ろ過の特徴として、ろ過速度が遅いため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。また、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。

緩速ろ過の特徴として、ろ過速度が遅いため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。また、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。

緩速ろ過の特徴として、ろ過速度が遅いため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。また、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。

緩速ろ過の特徴として、ろ過速度が遅いため、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。また、ろ過層の厚さを薄くし、ろ過速度を速くすることが必要である。



岡山市 三野浄水場

浄水場訪問記

名古屋市 鍋屋上野浄水場 訪問記

第5回緩速・生物ろ過国際会議のテクニカルツアーで、名古屋市の鍋屋上野浄水場を訪問しました。(訪問日：平成26年6月21日)

浄水場：鍋屋上野浄水場

事業体：名古屋市上下水道局

所在地：名古屋市千種区宮の腰町1番33号

給水開始年度：1914年、2010年から更新工事

緩速ろ過の施設能力：140,000 m³/日

急速ろ過法(150,000 m³/日)併設

ろ過面積：(1池当たり)3,420m²

ろ過池数：12池

原水：木曾川表流水(愛知県犬山市で取水)

浄水処理プロセス：普通沈澱*ー緩速ろ過ー塩素消毒

*普通沈澱池は、愛知県春日井市にある鳥居松沈澱池(37,000m³ 4池及び134,000m³ 1池)で、原水高濁度時のみ凝集剤を注入

鍋屋上野浄水場は、1914年からほぼ100年近く稼働していましたが、2010年から全面的な更新工事を行っています。工事はほとんど終了しており、2014年3月末から12池のろ過池のうち3池に水が入り、ろ過水を急速ろ過の着水井に戻しつつ生物ろ過膜を形成させているところでした。

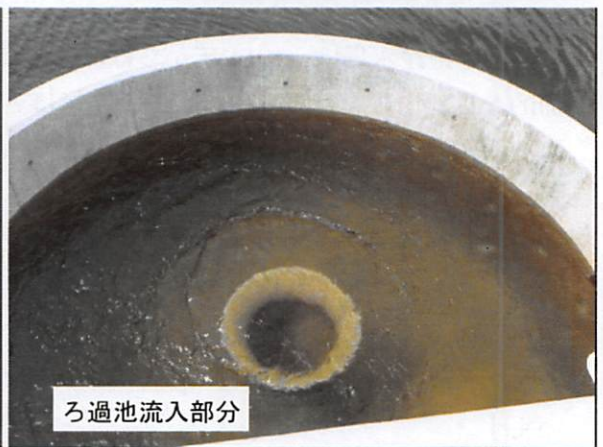
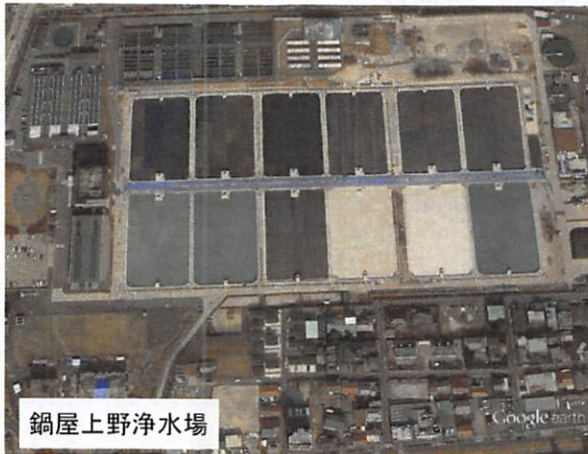
鍋屋上野浄水場の新しい緩速ろ過池の特徴は、越流管の流入部が可動式で浮遊している藻類などを効率よく排出できること、ろ過池の隅が丸くなっているなど滞留部分が出来にくい構造となっていること、生物ろ過膜の熟成を考慮し3辺が斜壁になっていることです。また、流入部分も水が均等に流れ、生物ろ過膜を損傷しないような工夫がされています。

なお、緩速ろ過法の施設能力の140,000 m³/日は、東京都の境浄水場について日本で2番目の大きさです。

写真：鍋屋上野浄水場、鳥居松沈澱池

緩速ろ過池、越流管

隅と斜壁、ろ過池流入部分



三重県いなべ市 藤原浄水場 訪問記

三重県いなべ市の藤原浄水場を訪問しました。(訪問日：平成 26 年 7 月 3 日)

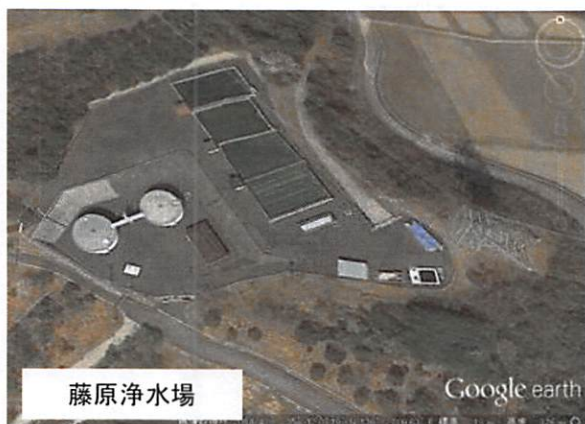
浄水場：藤原浄水場
事業体：いなべ市水道部
所在地：三重県いなべ市藤原町山口字地蔵ヶ原 3676 番地
給水開始年度：2006 年
緩速ろ過の施設能力：3,800 m³/日
ろ過面積：(1 池当たり) 398m²
ろ過池数：4 池
原水：浅層地下水(藤原町篠立三国ヶ岳 4313 番地で取水)
浄水処理プロセス：緩速ろ過-塩素消毒

藤原浄水場の原水を取水するための取水堰はトンネルの内部に設けられており、石灰岩地質の湧水を集めているためか、鍾乳洞を思わせるような炭酸カルシウムの沈積物がみられました。取水堰からは 300mm の導水管が浄水場まで 1.23km 布設されており、トンネル内は大変涼しく別世界の気分でした。

藤原浄水場の緩速ろ過池の特徴は、ろ過砂の上を不織布のシートで覆っていることです。シートは厚さ 3 mm 幅 1m で、ろ過池の縦方法に並べて敷いてあり、浮上及び移動防止のため砂を入れた塩ビパイプが載せてありました。生物ろ過膜がシートに形成されるため砂の汚れを少なくすること、ろ過池清掃時にシートを巻き取って搬出するため作業を容易にすることが目的です。搬出したシートは洗浄して再利用します。

また、石灰岩地質の湧水を原水としているため、シートの表面に薄い茶色の炭酸カルシウムの沈殿物のようなものがみられたことも特徴です。

写真：藤原浄水場，取水堰，トンネルと導水管，
緩速ろ過池，巻き取ったシート，シート洗浄機



藤原浄水場



取水堰



トンネルと導水管



緩速ろ過池



巻き取ったシート



シート洗浄機

韓国大邱(テグ)市の水道と下水道

～第7回世界水フォーラムテクニカルツアーに参加して～

1 大邱(テグ)市の水道

1.1 概要

大邱(テグ)市は、韓国南部に位置し、面積 885.70 km²、人口約 250 万人の韓国第 4 の都市である。その水道は、1918 年に 2,800m³/日の旧嘉昌(カチャン)浄水場で給水を開始して以来、図-1 及び表-1 に示したような現在の状況に至っている。



図-1 大邱(テグ)市水道の給水区域と浄水場

表-1 大邱(テグ)市水道

概要 (2013 年)	給水人口 252.5 万人、普及率 99.9%、使用量 304 L/人/日 日最大給水量 106.0 万 m ³ /日、日平均給水量 90.9 万 m ³ /日
水源	割合：洛東江(ナクトンガン)–73%、雲門(ウンムン)ダム–21%、嘉昌(カチャン)ダムと公山(コンサン)ダム–6% 水源施設：嘉昌(カチャン)ダム–流域面積 43km ² 、有効貯水量 890 万 m ³ 公山(コンサン)ダム–流域面積 60.3 km ² 、有効貯水量 450 万 m ³
浄水場	梅谷(メグク)浄水場：洛東江(ナクトンガン)より取水、施設能力 80 万 m ³ /日、高度浄水処理（オゾン処理、粒状活性炭ろ過） 汶山(ムンサン)浄水場：洛東江(ナクトンガン)より取水、施設能力 20 万 m ³ /日、高度浄水処理（オゾン処理、粒状活性炭ろ過） 高山(コサン)浄水場：雲門(ウンムン)ダムが水源、施設能力 35 万 m ³ /日、急速ろ過処理 嘉昌(カチャン)浄水場：嘉昌(カチャン)ダムが水源、施設能力 5 万 m ³ /日、急速ろ過処理 公山(コンサン)浄水場：公山(コンサン)ダムが水源、施設能力 4 万 m ³ /日、膜ろ過処理浄水場に改造のため休止中 竹谷(ジュッコク)浄水場：洛東江(ナクトンガン)より取水、施設能力 20 万 m ³ /日、工業用水用
配水池	51 ヶ所、総容量 46.2 万 m ³ 、平均貯留時間 10.3 時間、加圧ポンプ施設 94
配水管延長	7660Km
水道料金	一般居住用(1ヶ月) 1won は約 0.11 円 口径 13mm 基本料金 1310won 従量料金 460won/m ³ 口径 20mm 基本料金 1790won 従量料金 460won/m ³ 下水道料金（一般居住用、1ヶ月） 従量料金 300won/m ³

1.2 汶山(ムンサン)浄水場

大邱(テグ)市の最新浄水場である汶山(ムンサン)浄水場を訪問した。2000 年より建設を開始し、2009 年に取水及び浄水施設が完成し、2013 年からは前オゾン処理施設が完成して

いる。浄水場の施設能力は 20 万 m³/日であるが、一日平均給水量 11.3 m³/日を約 10 万戸、28 万人に給水している。

(1) 水源の状況

水源である洛東江(ナクトンガン)は、流域面積 23,384 km²、長さ 525 km で、朝鮮半島を南流する韓国最大の河川である。最上流部に、アントン(安東)ダム(総貯水量 12.48 億 m³)と臨河(イマ)ダム(総貯水量 5.95 億 m³)という多目的大ダムがある。また、流域からの家庭排水・農業排水による水質汚濁があり、1999 年から「洛東江(ナクトンガン)水系水管理総合対策」による体系的な流域管理が図られている。大邱(テグ)市水道の取水口上流には韓国有数の工業都市亀尾(クミ)市があり、かつて繊維工業によるダイオキシン汚染を経験している。また 1991 年には電子工場からのフェノール流出事故、1994 年には有機溶剤による汚染、2008 年には化学工場火災によるフェノール流出事故があり、供給停止に追い込まれている。このため、1991 年から、取水口上流地点に濁度、全有機炭素、微量有機化学物質(有機溶剤を含む)が測定できる自動連続監視網が整備され、リアルタイムで Web 閲覧できるようにされている。

(2) 浄水処理

水源の状況に対応するために、通常の急速ろ過法に加えて、前オゾン処理、後オゾン処理及び粒状活性炭を加えた高度浄水処理を行っている。各処理工程(図-2)及び訪問時(2015 年 4 月 16 日)の運転状況(下線)は以下の通りである。

- ①原水水質：水温 13.7℃、濁度 3.7NTU、pH7.67、アルカリ度 52.5mg/L
- ②前オゾン注入：水源ダム湖で繁殖する藻類に起因するかび臭、消毒副生成物の原料有機物の低減化、クリプトスポリジウムの不活性化を目的としている。注入率 1.2ppm
- ③前塩素注入：主にアンモニア処理を目的としている。注入率 3.8ppm
- ④着水井：水質事故など緊急時に備えて、粉末活性炭注入施設がある。
- ⑤凝集剤注入室：凝集剤としてポリ塩化アルミニウムを使用し、注入率は、原水水質を自動計測して計算している。注入率 13.6ppm
- ⑥フロック形成池／沈澱池：機械攪拌によるフロック形成池及び横流式沈澱池。6 池。沈澱水濁度の管理目標値 1.0NTU で年平均 0.33NTU。訪問時 0.21NTU
- ⑦砂ろ過池：屋内設置のグリーンリーフフィルター。12 池。アンストラサイト(50cm)及び砂(25cm)の複層ろ過で、ろ過速度 159m/日。72 時間で逆流洗浄。ろ過水濁度の管理目標値 1.0NTU で年平均 0.06NTU。訪問時 0.05NTU
- ⑧後オゾン注入：接触時間 7～10 分。有機物を生物分解性に変換する。注入率 0.22ppm
- ⑨粒状活性炭ろ過：10 池。生物活性炭による有機物の吸着と生物分解。72 時間で逆流洗浄、3 年で再生炭に交換。
- ⑩後塩素注入：消毒のための塩素注入。注入率 0.90ppm
- ⑪配水：管理目標値(水質基準値)-年平均値-訪問時。濁度(度)；0.1 以下(0.5 以下)-0.06-0.05、残留塩素(mg/L)；0.5-1.0(4 以下)-0.65-0.58、トリハロメタン(mg/L)；0.1(0.1 以下)-0.028。

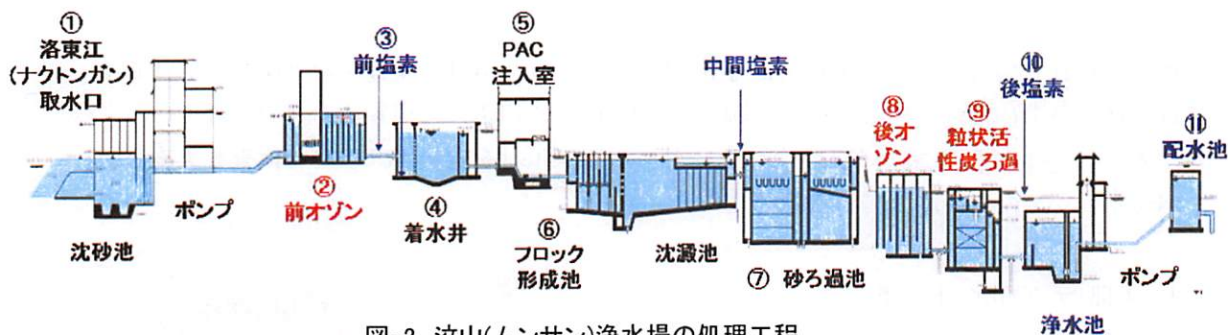


図-2 汶山(ムンサン)浄水場の処理工程

①洛東江(ナクトンガン)取水口



②前オゾン



⑤PAC 注入機



⑥沈澱池



⑦砂ろ過池



中央管理室



(2) 運転管理

汶山(ムンサン)浄水場では、所長以下、総務(12名)、浄水管理(5名)、機械・電気設備管理(20名)、水質管理(8名)の各担当で管理されている。各処理工程は、中央管理室からの遠隔監視制御により運転されている。水質管理は、各処理工程に設置された、濁度計や残留塩素計などの連続自動水質計の他、水質試験室が併設されて、原水から配水に至る各工程の毎日試験、毎週試験を実施している。

1.3 水質規制

韓国では、水道法により59項目の水質基準(病原微生物4、無機物質11、農薬5、消毒副生成物11、有機物質12、基礎的性状項目16)が定められ、加えて、浄水処理基準として3項目(ウイルス、ジアルジア、クリプトスポリジウム)の除去率が定められている。残留塩素については、給水栓において遊離残留塩素0.1mg/L(結合残留塩素の場合0.4mg/L)以上の保持が規定され、水質基準として4mg/L以下も定められている。これらに加えて、規制ではないが27項目の水道水質監視項目が設定されている。水質検査の頻度として、浄水

場で、毎日6項目、毎週8項目、毎月52項目、3月毎7項目の検査、給水栓水で毎月5項目の検査が求められている。また、水源の種類に応じて原水の監視頻度も定められている。

大邱(テグ)水道では、水質試験所で、これらの規制項目を含め175項目の検査を実施し、水道水の安全性を確認している。

2 大邱(テグ)市の下水道

2.1 概要

市内を7つの処理区に分け、7つの下水処理場で処理し、このうち4つの下水処理場が汚泥処理場を併設している(図-3及び表-2)。下水処理場は、2000年に大邱(テグ)市が全額出資して設立した大邱(テグ)環境公団が管理している。公団は、下水処理場の他、し尿処理施設、ゴミ焼却場、食品廃棄物処理施設なども管理・運営している。



図-3 大邱(テグ)市の下水処理区と下水処理場(●)

表-2 大邱(テグ)市下水道

概要 (2014年)	処理面積 138Km ² 、下水処理場処理能力 187.4 万 m ³ /日 日平均処理量 133.1 万 m ³ /日
下水処理場	北部(ブップ)処理場: 処理能力 17 万 m ³ /日、処理区面積 12.81 Km ² 、下水管 17.34 Km、放流先河川 琴湖江(クムホガン)右岸、汚泥処理場併設 達城川(タルソンチョン)処理場: 処理能力 40 万 m ³ /日、処理区面積 19.64 Km ² 、下水管 4.867 Km、放流先河川 琴湖江(クムホガン)左岸、汚泥処理場併設 西部(ソブ)処理場: 処理能力 52 万 m ³ /日、処理区面積 44.73 Km ² 、下水管 36.827 Km、放流先河川 琴湖江(クムホガン)左岸、汚泥処理場併設 玄風(ヒョンブン)処理場: 処理能力 2.3 万 m ³ /日、処理区面積 5.42 Km ² 、下水管 26.716 Km、放流先河川 洛東江(ナクトンガン)左岸 新川(シンチョン)処理場: 処理能力 68 万 m ³ /日、処理区面積 49.4 Km ² 、下水管 105.865 Km、放流先河川 琴湖江(クムホガン)右岸、汚泥処理場併設 安心(アンシム)処理場: 処理能力 4.7 万 m ³ /日、処理区面積 3.37 Km ² 、下水管 20.483 Km、 放流先河川 琴湖江(クムホガン)右岸 池山(チサン)処理場: 処理能力 3.4m ³ /日、処理区面積 2.60 Km ² 、下水管 1.277 Km、 放流先河川 新川(シンチョン)右岸

2.2 新川(シンチョン)下水処理場

大邱(テグ)市最大の新川(シンチョン)下水処理場を訪問した。1993年35万m³/日、1998年33万m³/日の施設が完成し、2002年より河川富栄養化対策として窒素・リン除去を行い、2012年からはリン除去施設を追加している。大邱(テグ)環境公団による管理は2002年より

開始している。分流式ではあるが、初期雨水は処理施設に入れ処理しているとのことであった。

(1) 下水処理及び汚泥処理施設

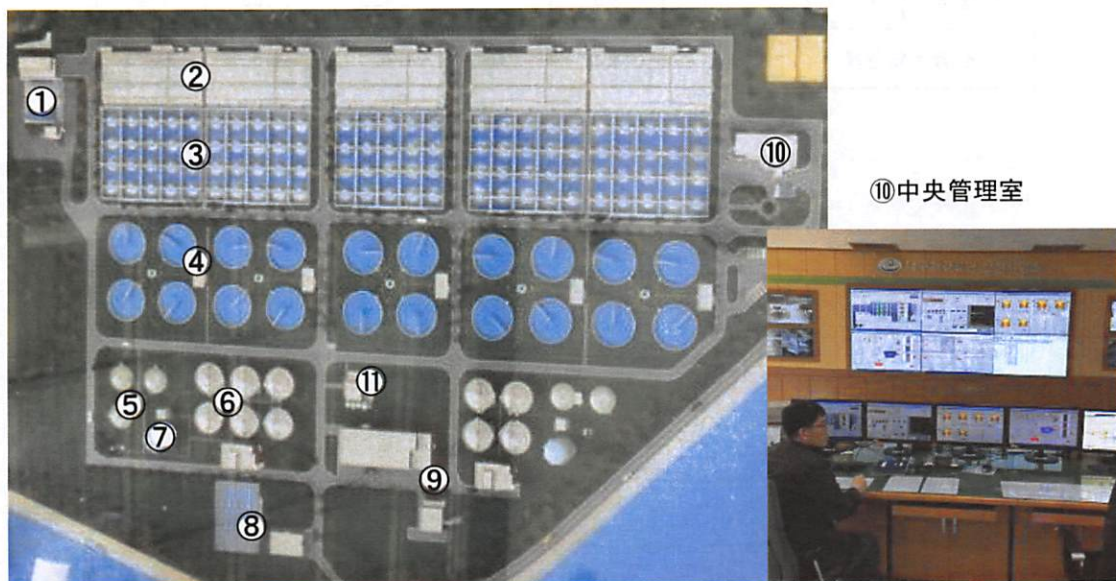
下水処理の各工程の施設は、沈砂池→最初沈澱池→生物反応槽→最終沈澱池→リン処理施設で、処理能力は68万m³/日である。2014年の処理量は約50万m³/日であった。汚泥処理の施設は、濃縮槽→消化槽→脱水機で、処理能力は165トン/日である。2014年の処理量は130トン/日であった。

各処理工程は、中央管理室からの遠隔監視制御により運転されている。

また、最初沈澱池上部に1335kWのソーラー発電施設を設置し、加えて汚泥処理の硝化ガス(メタンガス)を利用した1350kWのガス発電施設を設置している。これらにより、新川(シンチョン)事業所のエネルギー自立率は約30%になっている。なお、新川(シンチョン)事業所は、200トン/日の食品廃棄物処理施設も併設している。

各施設の配置は、以下の通りである。

- ①沈砂池及びポンプ所、②最初沈澱池(滞留時間3~4時間)、③生物反応槽(滞留時間約10時間)、④最終沈澱池(滞留時間4~5時間)、⑤汚泥濃縮槽、⑥消化槽、⑦硝化ガスタンク、⑧リン処理施設(凝集剤添加ろ過)、⑨汚泥脱水施設、⑩管理棟、⑪食品廃棄物処理施設



(2) 放流水水質

表3は2014年の各処理工程の平均水質で、良好な処理が行われ、放流水のBODも0.6mg/Lと低い。放流水は琴湖江(クムホガン)に放流されているが、このうち、10万m³/日は琴湖江(クムホガン)支流の新川(シンチョン)の維持用水として活用し、都心の親水空間を提供している。

図-4に示すように、新川(シンチョン)下水処理場の運転により、琴湖江(クムホガン)のBODが1988年の98.7mg/Lから現在の3~4mg/Lと大きく改善されている。

表-3 新川(シンチョン)下水処理場の水質(2014年、平均値)

区分	流量	BOD	COD	SS	T-N	T-P	大腸菌群
	m ³ /日	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	個/mL
流入水	504.313	235.1	99.6	245.3	36.7	5.055	142.180
最初沈殿池水	—	63	32.7	42.9	21.838	2.694	—
最終沈殿池水	—	2.3	7.6	5.2	10.424	1.236	—
放流水	485.417	0.6	5.8	1	9.432	0.125	280
放流水質基準		5	20	10	20	0.3	3.000

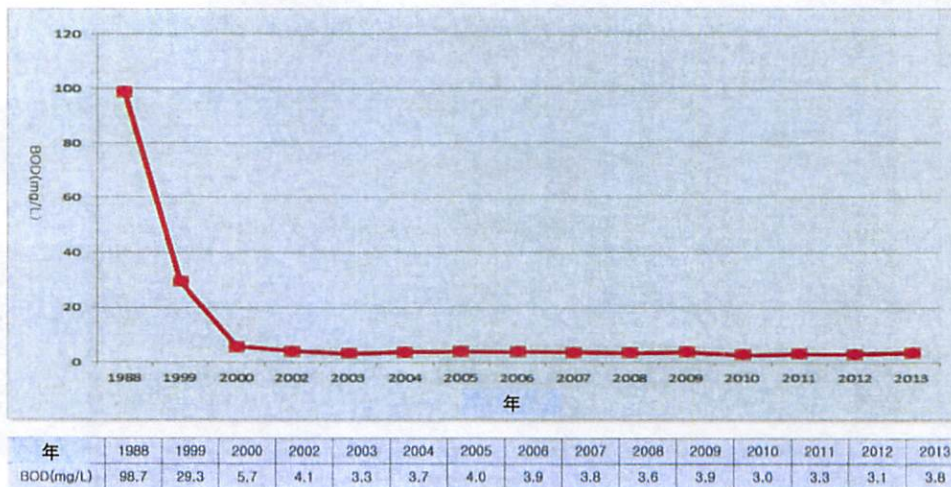


図-4 琴湖江(クムホガン)のBODの経年変化

オゾン処理を前処理とした緩速ろ過

1. はじめに

緩速ろ過は、ろ過層表面に自然に形成される生物ろ過膜の浄化機能を活用した浄水処理プロセスであり、日本では、小規模を中心に 2000 以上の施設がある。簡易な施設で良質な水道水が得られるという利点があるが、一方で緩速ろ過池への流入水水質には制約があり、原水がこれを満たさない場合には、前処理プロセスが必要となる。特に、流入水の濁質の問題が大きく、粗ろ過、普通沈澱などが代表的な前処理となっている。

オゾン処理について、日本では、後段に粒状活性炭ろ過を設けることが「水道施設の技術的基準を定める省令」で規定されているため、現状では、オゾン処理-緩速砂ろ過のシステムを採用することはできない。しかし、酸化剤、消毒剤としての効果が高いオゾン処理の後段に生物ろ過を設けることで、処理機能にシナジー効果があることが知られており、緩速ろ過が粒状活性炭（生物活性炭）ろ過と同様な機能を発揮できることは十分考え得る。北米や欧州では、1980 年代から緩速ろ過の前処理としてのオゾン注入について、パイロット実験を中心に調査研究が進められ、一部の浄水場で実施として稼動している。

既存の緩速ろ過池で、原水水質の変化に対応するために前処理施設を付加する場合、効果の高いオゾン処理を選択枝に加えることは、原水水質の適用可能性を広げるものである。ここでは、北米や欧州での報告を元に、前オゾン処理-緩速ろ過のシステムについて整理する。

2. オゾン処理-緩速ろ過のシステム

緩速ろ過の前オゾン処理については、いくつかの報告をもとに総論的にまとめられているものがある（表 1）。このうち、No. 2 の D. Hendricks の Manual of design for slow sand filtration は、L. Huisman et al. (1974) の Slow sand filtration (WHO) と並ぶ、緩速ろ過の代表的な教科書である。また、No. 5 の N. J. D. Graham et al. の Slow sand filtration: recent research and application perspectives は、2014 年に名古屋市で開催された、第 5 回緩速・生物ろ過国際会議の基調講演で発表された論文である。

表 1 緩速ろ過の前オゾン処理の総論的な記述

No.	著者等	名称, 発行
1	M. R. Collins et al. (1991)	Evaluating modifications to slow sand filters. J. AWWA, 82(9), 62-70.
2	D. Hendricks eds. (1991)	Manual of design for slow sand filtration. AWWA Research Foundation.
3	N. J. D. Graham (1999)	Removal of humic substances by oxidation/ biofiltration processes – A Review. Wat. Sci. Tech, 40(9), 141.
4	S. A. Cleary (2005)	Sustainable drinking water treatment for small communities using multistage slow sand filtration. Waterloo, Ontario, Canada.
5	N. J. D. Graham et al. (2014)	Slow sand filtration: recent research and application perspectives. In Progress in slow sand and alternative biofiltration processes. IWA publishing..

2. 1 通常の緩速ろ過システム

(1) 運転方法

前処理施設のない緩速ろ過は、原水をろ過池に導入し、4m/日程度の低速度でろ過し、ろ過水を塩素消毒して浄水とする簡易な浄水処理システムである。一般的には、図1に示した操作で運転される。ろ過池に充水した後、ろ過水を原水に戻すなどして放水しながら生物ろ過膜の形成を図る。生物ろ過膜

が形成された後は、徐々にろ過速度を上昇させつつ、ろ過水を使用する。ろ過閉塞が進みろ過が継続できなくなるとろ過を停止し、砂層表面の生物ろ過膜を削り取りなどで除去し、再び充水して次のサイクルに移行する。通常、ろ過継続日数は、30日以上である。

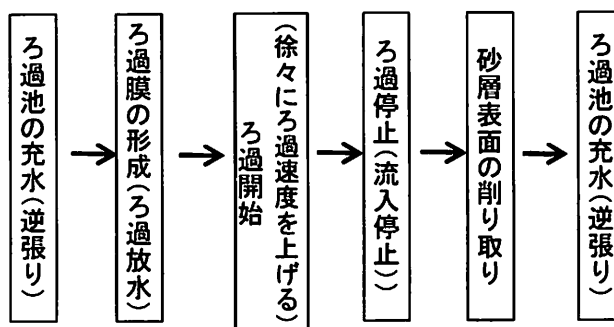


図1 緩速ろ過池の運転手順

また、砂層の削り取りを繰り返すと砂層厚さが薄くなっていくので、限界値に達すると新たな砂を補充する補砂が必要となる。

(2) 前処理プロセス

緩速ろ過は、砂層表面の生物膜でろ過が起こるので、生物ろ過膜に流入水中の濁質や生物ろ過膜を構成する藻類などが蓄積する。このため、流入水濁度が高いと急速なるろ過閉塞が起こる。通常は10度以下が目標値とされており、これを超える可能性がある場合は、普通沈澱池、粗ろ過、凝集沈澱池などの前処理プロセスが付加される。また、正常な浄化機能が発揮されるためには、生物ろ過膜が常に好氣的に保たれる必要があるため、原水中の有機物を低減化させるためにも、上記の前処理が行われる。

また、緩速ろ過には生物ろ過膜による捕捉、付着及び生物作用による浄化があり、濁質に含まれる成分、生物利用可能あるいは生物分解性の溶存有機物、親油性あるいは生物分解性の微量有機化学物質、鉄、マンガン、アンモニアなど生物酸化を受けやすい無機物質、細菌やウイルス等の病原体など、幅広い物質の除去機能がある。一方、フミン質など難分解性の溶存物質の除去率は低い。フミン質は消毒副生成物の原因物質となるので、それらにより水道水の水質基準が順守できないような場合にも、前処理プロセスの付加が必要となる。

2. 2 有機物の除去

(1) 処理効果

緩速ろ過では、生物利用可能あるいは生物分解性の有機物の微生物による除去と一部の難分解性有機物のろ過層への付着による除去がある。オゾンによる前処理の効果は、オゾンの酸化力により難分解性の有機物から生物利用可能な有機物を生成させ、それを後段の緩速ろ過で除去することである。緩速ろ過による有機物の除去率は、原水中の生物利用可

表2 オゾン-緩速ろ過による有機物質の除去率の報告

対象	除去率 (原水水質, O ₃ 注入率)	報告者 年	文献
溶存有機炭素 DOC	18-55% (2.9-6.1mg/L, <5 mgO ₃ /L)	Mallanby 1991	表1の3
	15-25% (-, 3.1-4.8 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 9-14%	Gould et al. 1984	
	22-32% (2.4-4.8mg/L, 1.1-2.5 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 12-21%	Cable et al. 1996	
	20-30% (-, 0.2-1.0 mgO ₃ /mgTOC) /O ₃ なし 15-20%	Sege et al. 1996	
	28% (3.0-7.9mg/L, 0.5 mgO ₃ /mgTOC)	Yordanov et al. 1996	
	22-36% (3.3mg/L, 0.1-1.0 mgO ₃ /mgDOC)	Dempsey et al. 1994	
	20-35% (7.6-8.2mg/L, 0.5, 1.0 mgO ₃ /mgDOC)	Malley et al. 1994	
	34-40% (4.0-5.0mg/L, 6,7 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 11%	Odegaard. 1996	表1の1
	55% (-, 1.82 mgO ₃ /mgDOC) /O ₃ なし 8%	Sontheimer et al. 1996	
	35% (-, 3 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 15%	Rachwal et al. 1988	
	35% (-, 5 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 12%	Zabel 1985	
	35%(-, 2-6 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 10-15%	Eighmy et al.1993	
トリハロメタン生成能	35-64% (0.31-0.63mg/L, 1.1-2.5 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 8-47%	Cable et al. 1996	表1の3
	34-64% (0.27mg/L, 0.1-1.0 mgO ₃ /mgDOC)	Dempsey et al. 1996	
	20-40% (0.40-0.51mg/L, 0.5, 1.0 gO ₃ /mgDOC)	Malley et al. 1994	表1の5
	40-70%(-, 2-6mgO ₃ /L) /O ₃ なし 10-15%	Eighmy et al. 1993	
UV254nm吸収	70% (-, 3 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 15%	Rachwal et al. 1988	表1の1
	39-54% (-, 3.1-4.8 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 11-15%	Gould et al. 1984	表1の4
	70%(E254-, 5mgO ₃ /L) /O ₃ なし 16%	Zabel 1985	表1の4
色度	70-80% (35-55 度, 5 mgO ₃ /L)	Gould et al. 1984	表1の3
	74% (15-29 度, 2.5-3.5 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 20%	Greaves et al. 1988	
	35-71%(14-27 度, 1.1-2.5 mgO ₃ /L) /O ₃ なし 0-31%	Cable et al. 1996	
	58% (9-74 度, 0.5 mgO ₃ /mgTOC)	Yordanov et al. 1996	
	67-82% (48 度, 6,7 mgO ₃ /mgDOC) /O ₃ なし-5%	Odegaard 1996	

能あるいは生物分解性有機物の割合に影響され、それが多いほど高くなる。また、オゾン処理の付加による効果は、原水中の難分解性有機物の割合が多いほど顕著になる。これについて、数多くのパイロット実験の報告があるので、それらを表2にまとめた。溶存状態の有機物の総量である溶存有機炭素 (DOC) は、30%程度の除去率となり、一部で緩速ろ過のみの除去率も記載しているが、オゾン処理により 10~20%の除去率の向上がみられる。トリハロメタン生成能は、塩素処理によりトリハロメタンとなる有機前駆物質の指標で DOCの一部に相当するが、オゾン処理により 30%程度と DOC より大きな除去率の向上がみられる。これは、塩素とオゾンが有機物分子内の二重結合など同じ部位と反応するため、共通の有機物質が関係することによると考えられる。波長 254nm における紫外線 (UV) 吸収は、トリハロメタン生成能と相関関係がある指標で、簡易に測定できるという特徴がある。これも、分子内の二重結合などと関係があるため、トリハロメタン生成能と同様の傾向がみられる。色度は黄褐色の程度を示すもので、自然水中に多く含まれる土壌起源の有機物であるフミン質の指標となっている。フミン質には二重結合を含む芳香環が多く含まれ、ト

リハロメタン生成能の主要因物質となるので、トリハロメタン生成能及び UV254 吸収と同様な傾向を示している。

(2) 処理のメカニズム

一般的に、自然水中では土壌起源のフミン質が有機物質の主成分となっている。フミン質は腐植物質ともいわれ、動植物の遺体が土壌微生物で分解された最終生成物で、フミン酸（土壌からアルカリ、弱酸のアルカリ塩などで抽出され、酸で沈殿する腐植画分で酸性の無定形高分子物質。芳香環や脂肪族鎖を骨格として多数の共役二重結合を含む。分子量は 1,000 以下から数 10 万以上まで。赤褐色または黒褐色）やフルボ酸（土壌からアルカリ、弱酸のアルカリ塩などで抽出され、酸で沈殿しない腐植画分で酸性の無定形高分子物質。多糖類やフェノール類を含む有機酸。フミン酸より淡色）などからなる。また、フミン質は生活排水にも含まれる。その他、水域で藻類の繁殖が多い場合、原水に藻類細胞及び藻類起源の有機物が含まれることがある。これらの有機物は、トリハロメタン等消毒副生成物の前駆物質となることから、浄水処理システムにおいて、これらを塩素注入の前に低減化しておくことが重要となる。

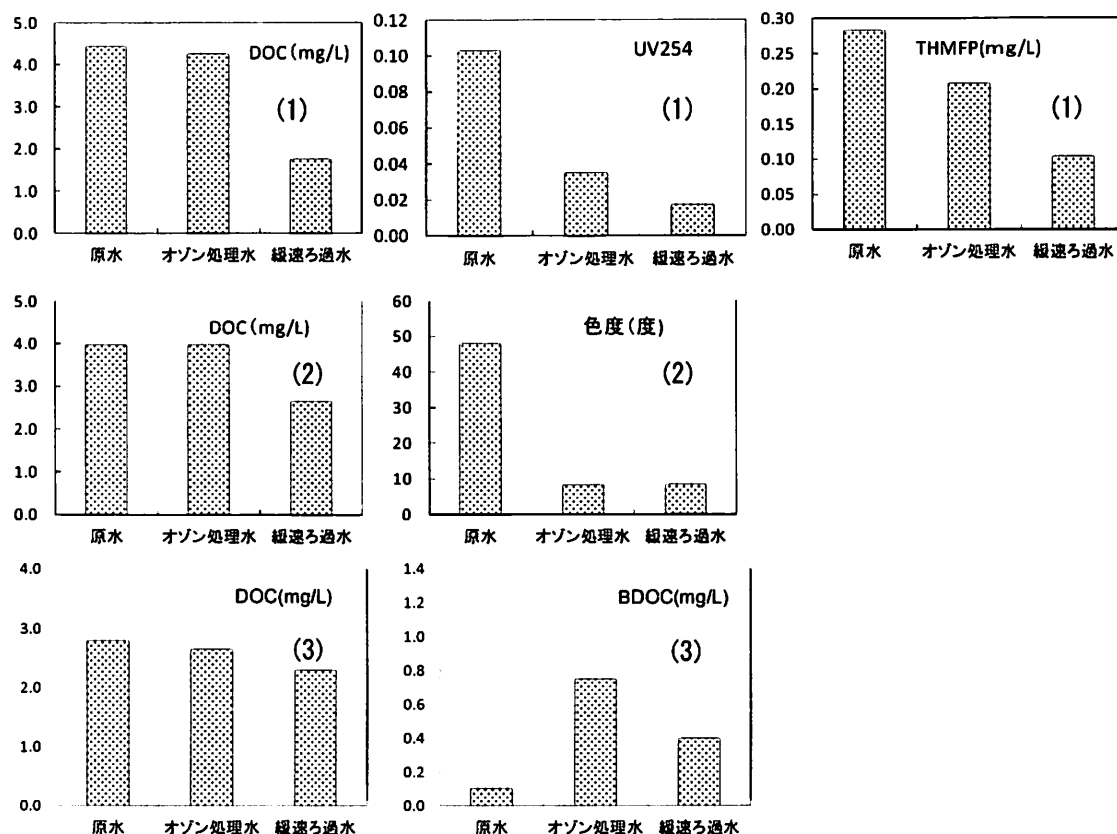


図 2 オゾン-緩速ろ過による有機物の除去、(1) Malley et al. (1993) : O_3 注入率 2.0 $mgO_3/mgDOC$ 、(2) Odegaard (1996) : O_3 注入率 $6mgO_3/L$ から作図、(3) Wricke et al. (1996) : O_3 注入率 $1.0 mgO_3/mgDOC$ から作図

フミン質とオゾンの反応では、オゾンによる芳香環の開裂と解重合が起こるとともに、生成したラジカルによる種々の有機物との反応が起こる。無機化はほとんど起こらず、分子量の大きなフラクシヨの減少、より分子量の小さいフラクシヨの増加及びオゾン副生成物の生成が起こる。このため、図2に示したように、DOCはほとんど変化せず、色度及び紫外線吸収の大きな減少、THMFPの減少がみられる。また、生物分解性有機炭素(BDOC)の増加も報告されているが、同化性有機炭素(AOC)の増加もある。

原水中に藻類が多い場合には、オゾンにより藻類細胞が破壊され、AOCが増加する。

表3 オゾン処理による緩速ろ過の生物ろ過膜の変化(表1の3の文献より)

測定指標	オゾン処理の影響	報告者 年
従属栄養細菌、細胞タンパク質、全菌数、細菌呼吸量	砂層表面から1cmまでの従属栄養細菌、細胞タンパク質は変化なし、細菌による呼吸量の増加	Dempsey et al. 1994
全菌数、ATP	砂層表面から6cmまでの全菌数、ATPの増加	Seeger et al. 1996
従属栄養細菌、細胞タンパク質、藻類量(クロロフィルa)	砂層表面の従属栄養細菌数が4-5倍に増加、10cmでは変化なし、細胞タンパク質はろ過初期に増加しその後同程度まで減少、クロロフィルaに影響なし	Yordanov et al. 1996

オゾン処理による生物ろ過膜への影響として、表3に示したように、砂層表面の生物ろ過膜の従属栄養細菌などの細菌群集が増加することがあり、これはオゾン処理によりBDOCが増加することと一致している。このため、オゾン処理により生成したBDOCやAOCは、原水中に含まれていたものも含めて、生物ろ過膜の細菌類に利用され減少する。表2のオゾン処理によるDOC除去率の向上は、これによるものと考えられる。

オゾン副生成物は、主にアルデヒド(ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、グリオキサール、メチルグリオキサール)とカルボン酸(ギ酸、酢酸、グリオキシル酸、ピルビン酸、ケトマロン酸)である。これらは、微生物に利用可能なAOCであり、緩速ろ過により除去されている。(表4)。また、クロラミンのみならずオゾンでも生成するとされているN-ニトロソジメチルアミン(NDMA)も、生物分解により減少する(緩速ろ過での除去率70%以上)ことが報告されている(Hung et al. 2010)。

表4 オゾン-緩速ろ過によるアルデヒド類の生成と除去(表1の3の文献より)

オゾン処理による生成	緩速ろ過による減少	報告者 年
ホルムアルデヒド(25 μ g/L)、アセトアルデヒド(4 μ g/L)、グリオキサール(11 μ g/L) : 2mgO ₃ /mgDOC	いずれも検出限界(それぞれ1、3、10 μ g/L)以下	Malley et al. 1993
アセトアルデヒド、グリオキサール、メチルグリオキサール合計30-50 μ g/L : 0.35-1.0mgO ₃ /mgDOC	いずれも検出限界以下	Seeger et al. 1996

2. 3 微量有機化学物質の除去

緩速ろ過における微量有機化学物質の除去について、親油性が高い（オクタノール-水分配係数が高い）物質は、原水中で濁質に付着して懸濁態となり易く粒子捕捉により除去される。また、原水中で溶存していても生物ろ過膜への付着により除去され易い。ダイオキシン類や農薬類の一部がこれに相当する。また、生物分解による微量有機化学物質の除去に関する報告もあり、例えば、藻類により生産されるかび臭物質や藍藻毒、農薬や医薬品、日用品などがある（表5）。これらの除去について、水温、関与する細菌類の馴養、他の成分濃度、ろ過池の運転条件などが大きく影響する。藍藻毒（ミクロキスティン）の例では、未暴露のろ過池の場合は数日経過後に除去が開始されたのに対し、既に暴露されていた場合には直ちに除去が始まっている（Grutzmacher et al. 2002）。

また、オゾン処理では、オゾンにより酸化される物質と生成したOHラジカルとの反応で除去される物質がある。さらに、オゾン処理と緩速ろ過を組み合わせる場合、オゾンにより生成した酸化物がろ過過程で除去されるケースや、オゾンにより生成したAOCが微量有機化学物質の除去に関与する細菌類の増殖に寄与することで除去率が向上するケースが考えられる。いずれにせよ、対処が必要な物質がある場合、パイロット実験を行い、除去性を確認していく必要がある。

表5 緩速ろ過による微量有機化学物質の除去

除去及び低減化の可能性がある物質	報告者 年
かび臭物質（ジェオスミン、2-メチルイソボルネオール）	Jobb et al. 2007
藍藻毒（ミクロキスティン）	Grutzmacher et al. 2006
難燃剤（プロモフェノール類）	Katayama-Hirayama et al. 2014
医薬品（イブプロフェン、ジクロフェナク、カルバマゼピン、スルファメトキサゾール）	Kuhlmann et al. 2006
医薬品（ジクロフェナク、ナプロキセン、イブプロフェン）	Erba et al. 2014

一方、水源や原水中の存在量が必ずしも把握されていなくても、緩速ろ過のこのような機能は防御装置（バリアー）として考えることができる。さらに、前オゾン処理を加えることで、突発的な水源水質事故に対する多段防御（マルチバリアー）とすることができる。

2. 4 無機物質の除去

緩速ろ過では、アンモニア態窒素及び亜硝酸態窒素は硝化により硝酸態窒素に酸化される。また、鉄、マンガンは、還元的な溶存イオンが生物酸化により不溶性となり除去される。これらには、生物ろ過膜が好氣的に維持されることが必要であり、嫌氣的になると逆にアンモニア態窒素やマンガンが溶出しろ過水中へ混入する。オゾン処理により溶存酸素濃度が上昇することは（図3）、この点でも有利な点となる。さらに、鉄、マンガンは、還元的な溶存イオンが酸化されて不溶性となり、緩速ろ過で除去され易い形態となる。

水中に臭化物イオンが存在する場合、オゾンにより酸化されて臭素酸が生成する。臭素酸は、健康影響の観点から水質基準値が設定されており、緩速ろ過など後段の処理プロセスで除去できないので、オゾン処理での生成量の制御が求められる。

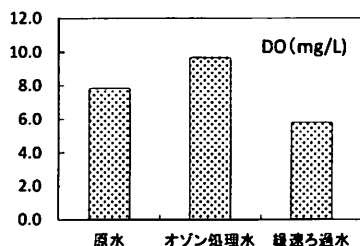


図3 オゾン-緩速ろ過による溶存酸素濃度の変化、
Malley et al.(1994) : O₃注入率 2.0 mgO₃/mgDOC から作図

2. 5 病原微生物の不活性化

緩速ろ過では、粒子除去による水中の病原微生物の除去に加えて、生物ろ過膜の生物群集（細菌、原生動物、小動物）の食物連鎖による不活性化がある。例えば、大腸菌の場合、生物ろ過膜への付着により 96%の除去であるが、原生動物による摂食が加わると 99.8%の除去率となるとの報告がある (Lloyd et al. 1996) また、微生物の除去率は生物ろ過膜の成熟度により異なることがあり、あるパイロット実験での大腸菌の除去率は、成熟した生物ろ過膜で 1.5~2.0log、削り取り直後では 0.5~1.5log であった (Unger et al. 2006)。クリプトスポリジウムでも、摂食と生物分解が重要な除去メカニズムで、生物ろ過膜とろ過層上部で除去が起こるとされている (Dullemont et al. 2006)。表6に緩速ろ過による病原微生物の除去率の例を示す。

表6 緩速ろ過による病原微生物の不活性化の例

病原微生物	除去率	文献
大腸菌群	1 ~ 3 log	Amy et al., 2006
腸管ウイルス	2 ~ 4 log	
ジアルジアシスト	2 ~ 4+ log	
クリプトスポリジウムオーシスト	> 4 log	

オゾンには、強い酸化力があり、細菌、ウイルス、原生動物に対する有効な消毒効果がある。特に、クリプトスポリジウムやジアルジアなどの耐塩素性病原微生物に対しては、CT値が遊離残留塩素に比べて小さく(クリプトスポリジウム:遊離残留塩素 1600mg/L・min、オゾン 2~3mg/L・min)、オゾン処理に優位性がある。オゾン処理が付加される場合、オゾンによる消毒効果も加わるので、病原微生物の不活性化効果はより高くなる。

アメリカ合衆国では、安全飲料水法の長期表流水処理強化規則により、クリプトスポリジウムは水源での存在量に応じた除去率（例えば、給水人口 1 万人以下の水道で、水源で 3 オーシスト/L 以上の場合、緩速ろ過法の除去率として 2.5log）、ジアルジアは 99.9%の除去率が求められている。このため、これらの除去率を確保が、前オゾンの導入の目的となっていることも多い。浄水処理効果の評価は除去率でなされている。また、濁度も病原性

微生物の指標として微生物項目に含まれているが、急速ろ過法で毎月の最大値 1NTU 以下、95%値 0.3NTU 以下、緩速ろ過法で毎月の最大値 5NTU 以下、95%値 1NTU 以下が定められている。日本のクリプトスポリジウム等対策指針で求められている 0.1 度以下より高い設定となっているので、浄水処理の評価の際留意する必要がある。

2. 6 オゾン処理の生物ろ過膜への影響

オゾン処理の緩速ろ過への負の影響として考えられているのは、損失水頭上昇速度の増加とそれに伴うろ過継続日数の減少である。緩速ろ過では、損失水頭が上昇し限界値に達した場合にはろ過停止して清掃を行う必要があるため、急速に損失水頭が上昇することは、緩速ろ過池の運転管理への大きな影響となる。図 4 には、オゾン処理の付加で損失水頭が上昇する例を示し、表 7 にパイロット実験で観測された結果を示すが、損失水頭上昇速度が増加しろ過継続日数が減少する例が多い中で、逆のケースもある。

緩速ろ過池の損失水頭の上昇に影響するものとして、生物ろ過膜に蓄積されていく濁質の他、ろ過膜藻類の藻体及び細胞外高分子物質 (EPS) と細菌類の EPS がある。藻類繁殖が損失水頭の上昇に大きく寄与するケースでは、オゾンにより藻類繁殖が抑制されることにより、ろ過継続日数が延長する (Cleary 2005)。一方、オゾン処理により AOC が増加すると生物ろ過膜の細菌類の増殖が進むため、その EPS により損失水頭が上昇する。この対応として、砂層上部 8 cm を有効径 0.8mm の粒径の大きなろ過砂に変更することにより、ろ過継続時間への影響を抑制できた例がある。この場合、生物ろ過膜の物質が砂層の 4~5cm 程度まで浸透していたことから、平面的ではなく 3 次元的な生物ろ過膜が形成されたことにより、損失水頭の上昇が抑えられたと考えられている (Collins et al. 1991)。また、ろ過膜藻類が *Melosira varians* のような糸状藻類の場合には立体的な生物ろ過膜が形成されるので、これらが優占するような場合には、損失水頭への影響は少ないと考えられる。これらの点についても、浄水場に固有の現象がみられるので、パイロット実験を行い、最適な運転管理方法を定めていく必要がある。

表 7 オゾンによる緩速ろ過の損失水頭とろ過継続日数への影響

損失水頭／ろ過継続日数への影響 (条件)	報告者、年	文献
ろ過継続日数の減少 (5 mgO ₃ /L)	Gould et al. 1984	表 1 の 3
冬と春にろ過継続日数の 34% の増加 (2.5-3.5 mgO ₃ /L)	Greaves et al. 1988	
冬に損失水頭上昇速度の増加、夏に減少 (<5 mgO ₃ /L)	Mallanby. 1991	
冬にろ過継続日数の増加、夏に減少 (1.1-2.5 mgO ₃ /L)	Cable et al. 1996	
冬に損失水頭上昇速度の増加、ろ過継続日数の減少 (0.5 mgO ₃ /mgTOC)	Yordanov et al. 1996	
損失水頭上昇速度の変化なし (0.12-0.36 mgO ₃ /mgDOC)	Dempsey et al. 1994	
損失水頭上昇速度 4 倍に増加 (1.08 mgO ₃ /mgDOC)		
ろ過継続日数の増加 (0.5, 1.0 mgO ₃ /L)	Malley et al. 1994	表 1 の 1
損失水頭上昇速度の増加	Eighmy et al. 1993	
損失水頭上昇速度変化なし (砂層上部有効径 0.8mm に変更)		
ろ過継続日数の延長 (3 mgO ₃ /L)	Rachwal et al. 1988	表 1 の 2

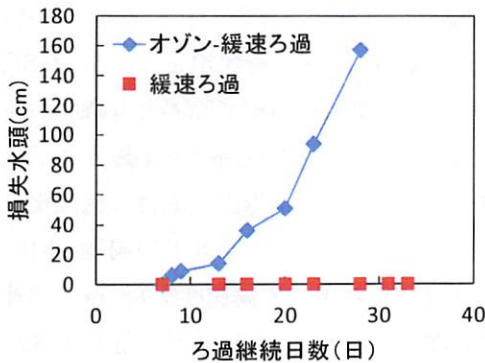


図4 オゾン-緩速ろ過による損失水頭の変化、
Malley et al.(1994) :O₃注入率 2.0 mgO₃/mgDOC
ろ過速度 0.2m/hr から作図

3. オゾン-緩速ろ過の実施設への導入

オゾン-緩速ろ過のプロセスを採用している例は、北米と欧州にあり、それらを表8にまとめている。

Oswestry 浄水場は、色度除去を目的として導入され、関係する THMFP や TOC の削減効果も得られているとともに、ろ過水濁度も 0.2NTU 以下と低く保たれている。原水の水質は、濁度<0.2~2.2NTU、色度 14~27、THMFP0.31~0.63mg/L である。(Cable et al. 1996)
Invercarnie 浄水場も色度除去を目的として導入されたが、AOC の増加による生物量の増加で、損失水頭上昇速度が増加しろ過継続日数が減少したとのことである。原水の水質は、色度 10~70 度、TOC3~8mg/L である。(Yordanov et al.1996)

表8 前オゾン-緩速ろ過プロセスを導入した浄水場

浄水場又は都市、国名	浄水プロセス、施設能力 (m ³ /日)	導入年
Oswestry 浄水場, North West Water、イギリス	湖水-前オゾン-緩速ろ過-pH 調整-塩素消毒、205,000	1994
Invercarnie 浄水場, Scottish Water、イギリス	原水貯留-前オゾン-緩速ろ過-pH 調整-塩素消毒、60,000	1995
Long Pond 浄水場, Blandford、アメリカ	ダム湖水-前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過-GAC ろ過- pH 調整-塩素消毒、946	-
North Haven、アメリカ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過-pH 調整、1000	2003
White River、カナダ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過、2121	2005
Black Lake、カナダ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過、788	2005
Aundeck Omni Kaning、カナダ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過、760	2004
Cowan Point、カナダ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過-GAC ろ過、640	2007
Canisbay Lake、カナダ	前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過、100	2003
アメリカのその他の MSF : Blandford, 800 m ³ /日(2007年)、Sandy Shores, 100 m ³ /日(2007年)		
カナダのその他の MSF : Pic River, 500 m ³ /日(1998年)、Shesheganing, 130 m ³ /日(1998年)、Wabauskang, 347 m ³ /日(2002年)、Fort Severn, 542 m ³ /日(2002年)、Ontario Parks, 150, 150, 100, 100 m ³ /日(2003年)、218 m ³ /日(2005年)、Sucker Creek, 760 m ³ /日(2004年)、Nicickousemenacaning, 188 m ³ /日(2005年)、Poets Cove, 150 m ³ /日(2005年)、Sheguiandah FN, 360 m ³ /日(2005年)、Onigaming FN, 850 m ³ /日(2005年)、Sturgeon Landing, 34 m ³ /日(2006年)、Caramat, 75 m ³ /日(2007年)、Rosspport, 275 m ³ /日(2008年)、Rocky Bay, 536 m ³ /日(2008年)、Sandy Bay, 1296 m ³ /日(2009年)、Moose Deer Point, 996 m ³ /日(2011年)		

アメリカ及びカナダの例は、いずれも小規模な施設(34-2121 m³/日)で、オゾン-粗ろ過-緩速ろ過のコンパクトな浄水システムの多段フィルター (MSF、図5)を採用している (MSF, homepage)。原水の色度が高い場合が多く (~40 度)、粗ろ過は上向流で除濁と有機物負荷の低減を目的とし、上層に粒状活性炭層を設けて、緩速ろ過の生物ろ過膜を保護する工夫をしている。North Haven 浄水場に導入された MSF は、色度除去、消毒副生成物の低減化、クリプトスポリジウムの不活性化を目的としており、表流水が水源 (原水平均濁度 1 NTU、色度 40 度、TOC6mg/L) で、平均オゾン注入率 4.5mgO₃/L、粗ろ過のろ過速度 1.8m/hr、緩速ろ過のろ過速度 0.29m/hr で運転し、ろ過水の平均水質は、濁度 0.2NTU 以下、色度 5 度以下、TOC 除去率 24%~34%である。粗ろ過の逆流洗浄は弁の開閉による下向流によるもの、緩速ろ過の洗浄は 2~3 ヶ月毎に生物ろ過膜を鋤き返して水と共に排出する方法で行われ、専任でないオペレーターでも運転可能ということも目的のひとつである。

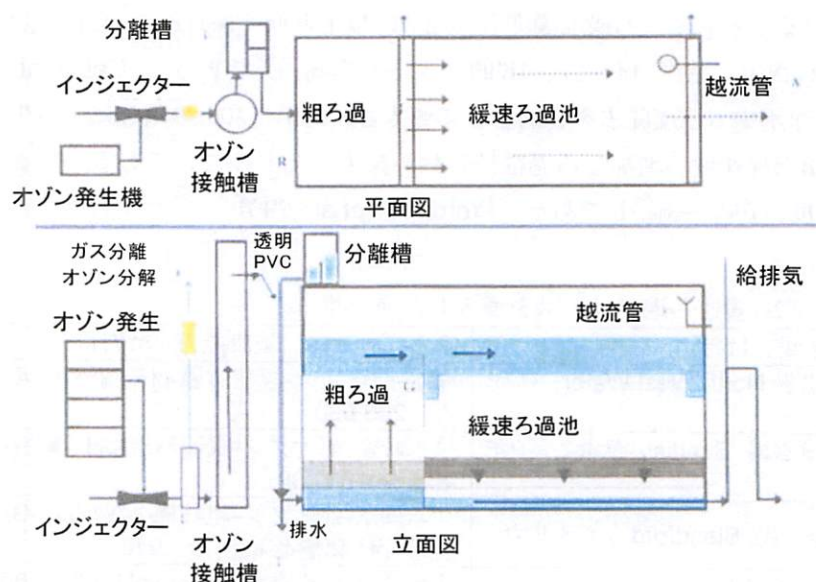


図5 前オゾン-粗ろ過-緩速ろ過池 (LeCraw et al.)

その他、ヨーロッパの大都市で大河川から取水する浄水場では、緩速ろ過を基本としているものの複雑な浄水システムとなっている (表9)。このうち、ロンドンのアシュフォードコモン浄水場は、オゾン-緩速ろ過のプロセスに近いが、ろ過層は砂単独ではなく、粒状活性炭層が砂ろ過層の中層に敷きこまれている (図6)。これは、ECの厳しい農薬の基準に対応するために導入され、上層の砂層で生物利用可能あるいは生物分解性の有機物を除去し、中層の粒状活性炭で微量有機化学物質を吸着除去するプロセスとなっている。

また、アムステルダムスのライダイク浄水場は、多くのプロセスを組み合わせた複雑なシステムとなっており、塩素消毒を行わないため、配水系統での細菌再増殖を抑えるよう

に AOC を低濃度に保つ (0.01mg/L 以下) 処理を行っている。

ヨーロッパの大都市の浄水場では、このような複雑なプロセスの組み合わせで、個別の物質の除去に加えて、緩速ろ過が微生物的な意味も含めて安定的な水道水を仕上げるという役割を果たしている。

表9 ヨーロッパの大都市の浄水場

浄水場	浄水処理施設	施設能力
アシュフォードコモン浄水場 (イギリス、ロンドン)	テムズ川→貯水池→(凝集剤注入)→急速ろ過→オゾン処理→粒状活性炭サンドウィッチ緩速ろ過→塩素消毒→クロラミン化	69 万 m ³ /日
イヴリィ浄水場 (フランス、パリ)	セーヌ川→前オゾン処理→(凝集剤注入)→粗ろ過→(凝集剤注入)→一次ろ過→緩速ろ過→オゾン処理→粒状活性炭ろ過→塩素消毒	30 万 m ³ /日
ライダイク浄水場 (オランダ、アムステルダム)	ライン川→凝集沈澱→急速ろ過→地下浸透→空気曝気→急速ろ過→オゾン処理→軟水化→粒状活性炭ろ過→粒状活性炭ろ過→緩速ろ過	19 万 m ³ /日
チューリッヒ・レング浄水場 (チューリッヒ、スイス)	チューリッヒ湖→前オゾン処理→pH 調整→急速ろ過→オゾン処理→粒状活性炭ろ過→緩速ろ過→二酸化塩素消毒	25 万 m ³ /日

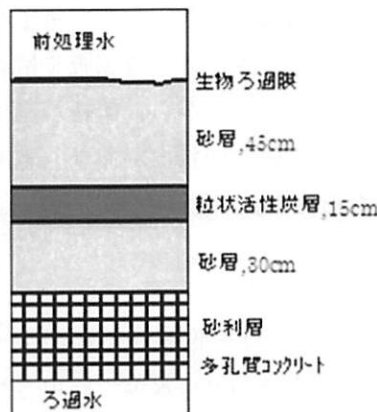


図6 アシュフォードコモン浄水場の緩速ろ過池

4. 日本における水質課題と緩速ろ過への前オゾン処理導入

日本では、緩速ろ過は小規模な施設がほとんどで、原水水質に比較的恵まれている浄水場が多いが、それでも新たな水質問題への対応が求められ、前処理プロセスの検討が必要な場合もある。最近の水質問題としては、消毒副生成物、クリプトスポリジウム対策、微量汚染物質があり、これらに対して、前オゾン処理の導入は有効な選択肢となる。

消毒副生成物について、健康影響の観点から臭素酸、塩素酸、ハロ酢酸 (クロロ酢酸類 3 種個別)、トリハロメタン (4 種個別と合計) 及びホルムアルデヒドの水質基準値が定められている。また、厚生労働省の通知により、個々の検査の結果が基準値を超過していても直ちに給水停止するのではなく、低減化策を講ずることとされているが、実態として、常に水質基準値を超えることの無いよう管理目標値を低く設定しているところが多い。

平成 27 年 4 月 1 日より、ハロ酢酸の水質基準値が強化されている。特に、トリクロロ酢酸は 0.2mg/L から 0.03mg/L となり、本来検出され易い項目でもあるので、これへの対応が必要な場合もある。近年の降雨形態の変化からフミン質の濃度が急上昇する事象が頻発し、前処理の無い緩速ろ過池で、トリクロロ酢酸の新基準値を遵守できないため取水停止等に対応している事例もある (Kado et al. 2014)。また、平成 24 年 5 月に利根川水系で発生したヘキサメチレンテトラミン流出事故を契機として浄水処理困難物質が定められたが、これには塩素処理でホルムアルデヒドを生成する物質も含まれる。ヘキサメチレンテトラミンは緩速ろ過では除去できないが、オゾン処理で除去することが可能である。

クリプトスポリジウム対策として、厚生労働省の通知により、ろ過施設を設置している場合、浄水処理工程の管理強化の観点から、ろ過水濁度を 0.1 度以下にすることが求められている。浄水場では、連続濁度計を設置するなど厳しく運用され、ろ過水濁度が 0.1 度を超過する場合には緊急の対応が行われている。濁度管理自体は必要であるが、オゾン処理によるクリプトスポリジウムやジアルジアを不活性化効果で、これらのリスクを低減化することができる。

微量汚染物質について、厚生労働省令で定められた水質基準項目の他に、水質管理目標設定項目と要検討項目が通知で示され、これらは逐次改正方式で毎年改正されている。このため、現在の水質基準項目以外に関しても、水源域の水質調査や情報収集を実施し、リスク評価に基づき対応していく必要がある。しかしながら、緩速ろ過は中小施設に多く、水質基準項目以外の項目は必ずしも測定されていない状況があり、水源水質事故時を含め微量汚染物質に対するマルチバリアーとなる浄水システムが求められる。

5. まとめ

緩速ろ過の前処理としてオゾン処理を行うことは、北米や欧州を中心に 1980 年代からパイロット実験により調査研究が進められ、いくつかの浄水場で採用されている。消毒副生成物前駆物質となるフミン質など、通常の緩速ろ過では除去しにくい有機物が生物利用可能となり、緩速ろ過での低減化が可能となる効果が得られている。また、オゾンにはクリプトスポリジウムに対する不活性化効果や微量化学物質の低減化効果があることも利点である。

日本では、緩速ろ過は小規模施設が多く、原水水質は比較的良好なところが多いが、それでも、消毒副生成物、クリプトスポリジウム、微量化学物質への対応が求められる場合もある。こうした場合、オゾン処理が緩速ろ過の前処理の選択肢のひとつとなることは、有効であると考えられる。

ただし、ろ過の前処理としてオゾン処理を導入する場合、物質の除去性及び損失水頭への影響などが、原水水質や運転条件を含め個々の浄水場に特有なものとなる可能性がある。このため、パイロット実験を実施し、最適な運転管理方法を定めておく必要がある。

6. 参考文献

- Amy, G., Carlson, M., Collins, M.R., Drewes, J., Gruenheid, S. and Jekel, M. (2006). Integrated comparison of biofiltration in engineered versus natural systems. Gimbel, R., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp3-11,
- Cable, C.J. and Jones R.G. (1966). Assessing the effectiveness of ozonation followed by slow sand filtration in removing THM precursor material from upland raw water. In Advance in slow sand and alternative biological filtration. Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp 29-37.
- Cleary, S.A. (2005). Sustainable drinking water treatment for small communities using multistage slow sand filtration. Waterloo, Ontario, Canada.
- Collins, M. R., Eighmy, T.T. and Malley Jr., J.P. (1991). Evaluating modifications to slow sand filters. J. AWWA, 82(9), 62-70.
- Dullemont, Y.J., Schijven, J.F., Hijnen, W.A.M., Colin, M., Magic-Knezev, A., and Oorthuizen, W.A. (2006). Assessing the role of the schmutzdecke in pathogen removal in riverbank and slow sand filtration. In Recent progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Gimbel, R., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp12-20.
- Erba, C.M., Tangerino, E.P, Isique, W.D. and Campos, L. C. (2014). Removal of anti-inflammatory compounds by ecological filtration. In Progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Nakamoto, N., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. and Gimbel, R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp147-152.
- Graham, N.J.D. (1999). Removal of humic substances by oxidation/biofiltration processes – A Review. Wat. Sci. Tech., 40(9)141-148.
- Graham, N.J.D. and Collins, M. R. (2014). Slow sand filtration: recent research and application perspectives. In Progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Nakamoto, N., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. and Gimbel, R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp3-16.
- Grutzmacher, G., Bottcher, I., Chorus, I., and Bartel, H., (2002). Removal of microcystins by slow sand filtration. Environ. Toxicol. 17(4), 386-394.
- Hendricks, D. ed. (1991). Manual of design for slow sand filtration, AWWA Research Foundation.
- Huisman, L. and Wood, W.E. (1974). Slow sand filtration. WHO.
- Hung, H.-W., Lin, T.-F., Chiu, C.-H., Chang, Y.-C. and Hsieh T.-Y.,(2010). Trace analysis, of N-nitrosoamines in water using solid-phase microextraction coupled with gas chromatograph-tandem mass spectrometry. Water Air Soil Pollut 213, 459-469.
- Jobb, D.B., Anderson, W.B., LeCraw, R.A. and Collins, M.R. (2007). Removal of

- emerging contaminants and pathogens using modified slow sand filtration: An overview. American water works association, Annual conference.
- Kado, K, Takao, K. and Hashiwata, K., (2014). The countermeasure against the increase of disinfection by-products concentration by humic substances at a water purification plant using a slow sand filtration system. In Progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Nakamoto, N., Graham, N. J.D., Collins, M. R. and Gimbel, R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp259-263.
- Katayama-Hirayama, K, Suzuki, H., Toda, N., Tauchi, A., Fujioka, A., Akitsu, T., Kaneko, H., and Hirayama, K., (2014). Removal of bromophenols by slow sand filtration. In Progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Nakamoto, N., Graham, N. J.D., Collins, M. R. and Gimbel, R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp153-160.
- Kuhlmann, B., Zullei-Seibert, N., Norte, J., and Grote, M., (2006). Behavior of selected drugs during slow sand filtration. In Recent progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Gimbel, R., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), IWA Publishing, UK, pp188-193.
- LeCraw, R.A., and Jobb, B. (2011). Meeting filtration and disinfection byproduct rules with modified slow sand filtration. In Clean and safe drinking water workshop.
http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/training/adww/decade/13_Bob_LeCraw.pdf
- Lloyd, B. J. (1966). The Significance of Protozoa Predation and Adsorption for the Removal of Bacteria by Slow Sand Filtration. In Advance in slow sand and alternative biological filtration. Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp129-138.
- Malley, J. P., Eighmy, T. T., Collins, M. R., Royce, J. A. and Morgan, D. F. (1993). The performance and Microbiology of Ozone-Enhanced Biological Filtration., J. AWWA. 85(12), 47-57.
- MSF: MSF Case Studies, <http://www.msfilter.com/case-studies.php>
Package plants for small drinking water applications,
http://www.msfilter.com/pdf/MSBrochure_july30-09_v2.pdf
- Odegaard, H. (1966). The development of an Ozonation/Biofiltration Process for the Removal of Humic Substances. In Advance in slow sand and alternative biological filtration. Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp39-50.
- Unger, M. and Collins, M. R. (2006). Assessing the role of the schmutzdecke in pathogen removal in riverbank and slow sand filtration. In Recent progress in slow sand and alternative biofiltration processes. Gimbel, R., Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.) IWA Publishing, UK, pp21-29.

- Wricke, B., Petzoldt H., Heiser H. and Bornmann, K. (1966). NOM- Removal by Biofiltration after ozonation- Results of a pilot plant test. In Advance in slow sand and alternative biological filtration. Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp51-60.
- Yordanov, R.V., Lamb, A.J., Melvin, M.A.L and Littejohn, J. (1966). Biomass characteristics of slow sand filters receiving ozonated water. In Advance in slow sand and alternative biological filtration. Graham, N. J.D. and Collins, M. R. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, 107-118.

緩速ろ過における藻類の影響

1. はじめに

緩速ろ過法は生態学的原理を活用した浄水処理方法で、一次生産者である藻類は生物ろ過膜の重要な構成要素となっている。緩速ろ過池では、この生物ろ過膜を構成する藻類に加えて、水源や前処理の沈澱池で繁殖した藻類やろ過池水で繁殖した藻類が存在する。藻類は、光合成による有機物生産が生物ろ過膜の成熟に寄与する他、発生する酸素により生物ろ過膜の好気性維持に寄与するなどの効果がある反面、ろ過閉塞や濁度検出など様々な障害の原因ともなっている。緩速ろ過池では、種々の藻類が混在しているが、ある種類が多くなると障害が顕在化することがある。これらの影響と対策は、藻類の種類や緩速ろ過池により異なることが多いので、それらについて整理する。

2. 藻類の繁殖

2. 1 浮遊性藻類 (植物プランクトン)

(1) 水源での繁殖

浮遊性藻類は、湖沼やダム湖で繁殖する。藻類は、リンや窒素などの栄養塩を取り込んで光合成により増殖するが、藻類の種類と量は、栄養塩の量、季節（水温、日射量）、水理（水位、水の滞留時間、水温成層）に影響される。富栄養化は、植物プランクトンの増殖が引き金となって起こる生態系全体の変化であるが、栄養塩が少ない貧栄養湖では珪藻類が、栄養塩の多い富栄養湖では藍藻類が優占することが多い（図1）。また、同じ湖においても、春と秋には珪藻類が夏には藍藻類が優占することがある（図2）。浮遊性藻類が大繁殖した状態を水の華といい、*Microcystis* のような藍藻類により水面に青緑色の粉を撒いたような状態になることをアオコ、*Peridinium* のような渦鞭藻類が水面を赤褐色に変える状態を淡水赤潮ということがある。

ダム湖は、天然の湖沼と河川の間隔的な性格を持ち、水の滞留時間が2週間以上ないと植物プランクトンが自生しないとされ³⁾、滞留時間が少ない流れダムは河川と同様に考えることができる⁴⁾。ただし、ダムが同じ河川に連続して設置されている場合には、複数のダム湖で継続的に繁殖が進む場合もある。

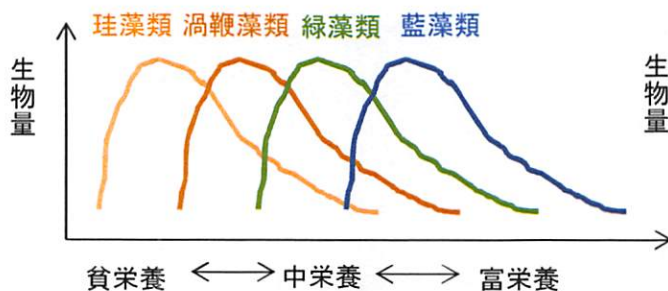


図1 栄養度と優占する藻類の種類¹⁾

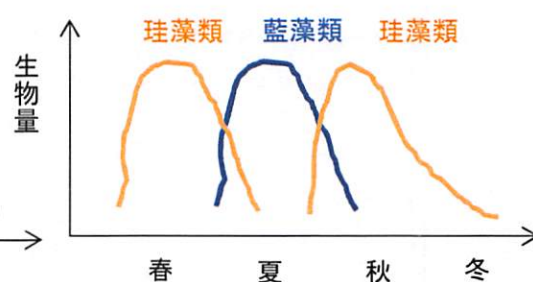


図2 優占する藻類の種類の季節変動²⁾

(2) 普通沈澱池での繁殖

濁度低減化を目的として設置されている普通沈澱池の滞留時間は1日程度になるので、通常は浮遊性藻類が自生することはない。ただし、図3に示したような矩形の沈澱池であっても、流入部付近に水が混合しにくい部分（停滞水塊）ができることがあり、そこで藻類が繁殖することがある。僅かではあるが、沈澱池内の水より流入水の水温が低いことが多く流入水が中低層に流れ込むことから、表面付近がより停滞し易くなるので、走光性のある藻類の方が繁殖に有利である⁵⁾。

また、沈澱池の流入水に含まれる藻類が対数増殖期にあるような場合には、停滞水塊がなくても数日の滞留で藻類が増殖することもある。

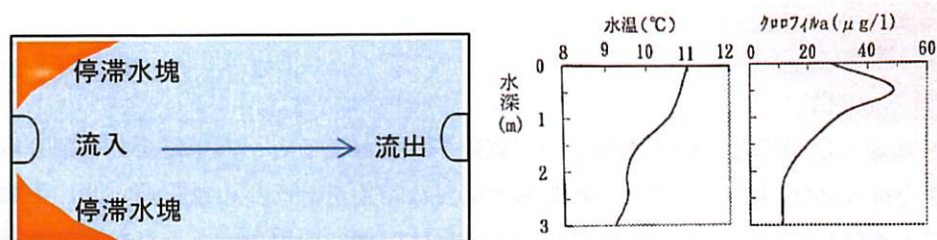


図3 普通沈澱池での水流と停滞水塊

(3) 緩速ろ過池での繁殖

緩速ろ過池では、滞留時間が半日以下と短いので、通常は浮遊性藻類が自生することはないが、流入部の構造やろ過池流入水量によっては停滞水塊ができ、そこで藻類が繁殖することがある。緩速ろ過池では、全体に生物ろ過膜への下向き流速があるので、その流れに逆らって表面付近に集結できる走光性のある藻類の方が繁殖に有利である⁶⁾。

2. 2 附着性藻類

(1) 水源での繁殖

附着性藻類は、河床の石の表面などに附着して繁殖する。藻類の種類と量は、栄養塩の量、季節（水温、日射量）など浮遊性藻類と同じ一次生産者としての要因に加えて、食植性動物の摂食圧や洪水など剥離を引き起こす流速増加に影響される。また、光の受けやすさから、平面的に附着する単細胞藻類から立体的に附着する単細胞藻類、さらには糸状の群集を作る藻類へと遷移することもある²⁾。

附着性藻類の緩速ろ過への影響は、水源河川で繁殖した藻類が剥離し原水に混入することである。剥離は、流速が上昇する洪水時に多くなる。別の影響としては、かび臭物質など附着性藻類が産生する物質が原水に混入することがある。

(2) 緩速ろ過池の上流の水道施設での繁殖

日射を受ける取水口、開渠、沈砂池や普通沈澱池の壁面で附着藻類が繁殖することがある。藻類の種類と量、緩速ろ過への影響は水源河川と同じであるが、水量等が制御されて

いることが多く、より安定的な繁殖の場となっていることが多い。

(3) 緩速ろ過池での繁殖

覆蓋のない緩速ろ過池では、砂層表面に付着性藻類が繁殖して生物ろ過膜を構成する。原水中に水源河川や水道施設で繁殖した付着性藻類が多い場合や前のサイクルで繁殖していた種が壁面等に残存している場合などは、それらがいち早く繁殖し始めるが、その後緩速ろ過池の環境（水温、日射、栄養塩、動物の摂食）などに応じた種へと遷移していく。当初は珪藻類が優占し、その後ユスリカの摂食により緑藻類へと変化している例も示されている。緩速ろ過池のろ過継続期間は1ヶ月以上と長いため、ろ過開始時期にずれが生じることから、ろ過池ごとに異なった藻類がみられることもある。

3. 藻類による障害⁷⁾⁸⁾⁹⁾

(1) ろ過閉塞

緩速ろ過の場合、損失水頭が一定値以上に上昇すると、ろ過停止して削り取りなどの清掃を行う必要があるため、ろ過閉塞は重要な障害である。ろ過継続と共に生物ろ過膜に濁質が蓄積していくので、損失水頭の上昇自体は通常現象であるが、その緩速ろ過池で設定しているろ過継続時間を短縮せざる得ない場合に障害となる。

藻類がろ過閉塞を引き起こすケースとして、以下のようなものがある。

- ①藻体がろ過膜上に平面的に蓄積：ケイ酸の殻を持つ浮遊性珪藻類が流入水に多く含まれる場合や付着性珪藻類がろ過膜上で繁殖する場合に顕著である。
- ②細胞外高分子物質（EPS）を産生する藻類がろ過膜上に蓄積：緑藻類や藍藻類で、寒天質のEPSに包まれる藻類が緩速ろ過池で繁殖する場合に顕著となる。

(2) ろ過池からの漏出

藻類は微細な粒子でもあるので、ろ過池水に多く含まれると、ろ過層を通過してろ過水に混入することがある。漏出が多くなると、クリプトスポリジウム等対策指針で求められているろ過水濁度0.1度を超過する場合や藻類の色による着色障害が生じることがある。また、藻類は有機物で構成されるので、残留塩素の減少や消毒副生成物の増加に繋がることもある。

漏出に関する藻類がろ過池水に多く含まれるケースとして、以下のようなものがある。

- ①ろ過池流入水に含まれる藻類又はろ過池で繁殖する藻類：小型の珪藻類、緑藻類及び藍藻類に可能性がある。
- ②緑藻類の遊走子が一斉に放出：生殖のため母細胞から遊走子が一斉に放出され、昼間は走光性により表面付近に集まるが、夜間は水流と共にろ過膜付近に集積し大きな負荷となる。

緩速ろ過池での粒子除去機構は、輸送（篩分け、沈殿、遮り、拡散）及び付着であるが、生物ろ過膜が健全でも粒子除去率は99%～99.9%である。このため、藻類量が多くなると漏出量も多くなる。さらに、生物ろ過膜が十分成熟していない場合や生物ろ過膜が薄くな

っている場合には、漏出の問題がより大きくなる。後者は、以下のような場合である。

- ①生物ろ過膜を構成する藻類の小動物（ユスリカ、オタマジャクシ等）による摂食：移動性の少ない小動物がろ過膜藻類を摂食し、その部分の生物ろ過膜が薄くなる。生息密度が大きいと影響が大きくなるが、細菌叢も含め生物ろ過膜が砂層内で比較的厚く形成されている場合には、濁質はそこで捕捉されるので影響は少なくなる。
- ②ろ過池流入部での流入水流による洗掘：ろ過池内での流入水の流向が生物ろ過膜に向かっている場合、洗掘が起こりろ過膜が薄くなる。ろ過池流入水量が多いほど、ろ過池水の水深が浅いほど影響が大きくなる。
- ③ろ過膜を伴う藻類の浮上：(4)で述べる。
- ④壁面短絡流：壁面と砂層の境界面で短絡流が発生し、砂層内に濁質が浸入する。ろ過面積の小さい緩速ろ過池ほど影響が大きくなる。
- ⑤砂層内での気泡発生：砂層内が負圧になり微細気泡が発生し、集結した泡が生物ろ過膜を破って水面まで浮上すると、生物ろ過膜に穴が開き、その部分から砂層内に濁質が浸入する。

(3)ろ過膜藻類が浮上後沈降して腐敗

ろ過膜藻類に光合成で作られた微細酸素が付着し、その浮力によって表面付近まで浮上する。水面付近で酸素が大気中に揮散すると、浮力が失われて沈降する。この場合、ろ過池の水流や風向により、浮上した藻類が特定の場所に集まり、ろ過膜上に厚く堆積することがある。堆積物の内部には水が通り難く、溶存酸素の供給が少なくなり有機物の腐敗が起こり、部分的ではあるが、アンモニア態窒素やマンガンの溶出が起こる。これらは、残留塩素の低下や黒水障害につながる。

浮上が起こり易い藻類は、群体を形成する付着性の珪藻類や緑藻類である。

(4)ろ過膜藻類が浮上時にろ過膜損傷

(3)で浮上するろ過膜藻類のうち、群体に仮根などの付着部をもつものは、浮上時にろ過砂とともにろ過膜を剥がして持ち上げてしまうことがある。この部分では、濁質が砂層内に侵入しやすくなり、ろ過水濁度検出に繋がることがある。ただし、細菌叢を含む生物ろ過膜が砂層内で比較的厚く形成されている場合には、濁質はそこで捕捉されるので影響は少なくなる。

(5)異臭

藻類が産生する臭気には、かび臭、生ぐさ臭、魚臭、青草臭などがあり、これらの臭気物質は、低濃度であれば緩速ろ過の生物分解作用で除去される。臭気物質には、藻体内に保持されているものと、死滅若しくは衰退により水中に放出されたものがあるため、生物ろ過膜で藻類が捕捉される場合には順次水中に放出されて生物ろ過膜で分解される。藻類がろ過層を通過し漏出する場合には、塩素処理により藻体から臭気物質が放出されることもある。生ぐさ臭、魚臭、青草臭には、残留塩素により分解されるものがある。また、かび臭物質は残留塩素では分解できないため重要で、ジェオスミン及び 2-メチルイソボルネ

オールについて、水質基準値が定められている。

かび臭物質を産生する藻類は藍藻類、その他の臭気物質は、緑藻類、珪藻類、渦鞭藻類によってつくられる。

(6)健康影響物質

藻類が産生する健康影響物質として知られているのは藍藻毒で、肝臓毒のマイクロキスチンLRや神経毒のアナトキシン-aがある。これらは、緩速ろ過の生物分解作用で減少し、さらに、マイクロキスチンLRは塩素処理で、アナトキシン-aは光で分解が進むとされている。

4. 藻類の種類と障害⁷⁾⁸⁾⁹⁾

(1)珪藻類

珪藻類はケイ酸質の殻を持ち、色素はクロロフィルaとcの他に、キサントフィル等の色素を含むので黄褐色を呈する。浮遊性珪藻は、水源の湖沼やダム湖で繁殖したものが原水に含まれる。普通沈澱池や緩速ろ過池で自生することはほとんどないが、対数増殖期にあるものが数日の滞留で増殖することがある。原水に含まれる付着性珪藻は、水源河川の河床から剥離したものである。また、ろ過膜藻類を形成する付着性珪藻は緩速ろ過池で繁殖したものである。珪藻類は、死細胞であってもケイ酸の殻が残るため、ろ過閉塞が共通の障害である。その中で、小型のものは、ろ過層を通過して濁度検出を引き起こすことがある。*Melosira varians* は、立体的なるろ過膜を形成しろ過閉塞は起こしにくい、光合成による酸素が付着して生物ろ過膜から離脱して浮上し、再沈降して堆積し腐敗する。その離脱の際、ろ過膜を損傷することがある。

表1 珪藻類の特徴と障害

藻類	特徴		主な属	繁殖	障害	
珪藻類	浮遊性	群体形成	<i>Asterionella, Aulacoseira, Fragilaria</i>	①②	a	
		単細胞		<i>Attheya, Synedra</i>	①②	a
			(小)	<i>Cyclotella, Nitzschia, Stephanodiscus</i>	①②	a b
	付着性	群体形成	(付)	<i>Melosira, Gomphonema</i>	③	c d
				<i>Fragilaria, Synedra</i>	③	a
		単細胞		<i>Cymbella, Navicula, Coccoconeis, Nitzschia</i>	①③	a
特徴	(付):付着部有り (小):小型					
繁殖	①:水源 ②:沈澱池 ③:緩速ろ過池					
障害	a:ろ過閉塞 b:ろ過池からの漏出 c:浮上後沈降して腐敗 d:浮上時にろ過膜損傷					

(2)緑藻類

緑藻類は、淡水に多くみられる藻類で、クロロフィルaとbの他α及びβカロチン、ルテイン等を含み緑色を呈する。浮遊性緑藻は、水源の湖沼やダム湖で繁殖したものが原水

に含まれる場合と、普通沈澱池や緩速ろ過池で自生するものがある。この場合、鞭毛と眼点による走光性があると水流に逆らって表面付近に集積し易く、繁殖に有利である。主な障害はろ過閉塞とろ過池からの漏出による濁度検出である。藻類の産生する寒天質被膜があるところ過閉塞が起こり易く、小型のものはろ過層を通過してろ過水濁度検出に繋がることがある。また、多くのものが、大繁殖すると生ぐさ臭や青草臭などの異臭をつける。付着性で群体を形成するものは、ろ過膜藻類となる。ろ過閉塞が共通の障害であるが、遊走子を放出するものはろ過水濁度検出を引き起こす。また、酸素が付着して生物ろ過膜から離脱して浮上し、再沈降して堆積し腐敗することがある。付着部のあるものは、生物ろ過膜の損傷に繋がることがある。

表2 緑藻類の特徴と障害

藻類	特徴		主な属	繁殖	障害
緑藻類	浮遊性	群体形成	<i>Scenedesmus, Straustrum,</i>	①②③	a b e
			<i>Mougeotia</i>	①②③	a e
			(走)(寒) <i>Eudorina, Pandorina, Volvox</i>	①②③	a e
		(寒) <i>Sphaerocystis</i>	①②③	a	
		単細胞	<i>Closterium</i>	①	a e
			(小) <i>Cosmarium</i>	①	a b
	(走) <i>Chlamydomonas, Carteria,</i>		①②③	b e	
	付着性	群体形成	<i>Spirogyra, Zygnema</i> (寒)	③	a c
			(遊) <i>Hydrodictyon</i>	③	b c
			(遊)(寒) <i>Tetraspora</i>	③	a b
			(遊)(付) <i>Cladophora, Oedogonium, Ulthorix</i>	③	a b c d
			(遊)(付) <i>Stigeoclonium, Draparnaldia</i> (寒)		
特徴 (走):走光性 (遊):遊走子放出 (付):付着部有り (小):小型 (寒):寒天質被膜 繁殖 ①:水源 ②:沈澱池 ③:緩速ろ過池 障害 a:ろ過閉塞 b:ろ過池からの漏出 c:浮上後沈降して腐敗 d:浮上時にろ過膜損傷 e:異臭					

(3) 藍藻類

藍藻類は、細胞内に明確な核がなく、色素はクロロフィル a の他にフィコシアニンを含むので、通常は青藍色を呈する。藍藻による障害で最も大きなものは、かび臭物質の産生で、藍藻毒を作るものもある。これらは、緩速ろ過により低減化されるが、濃度により追加の対応も必要となる。浮遊性藍藻類は、水源の湖沼やダム湖で繁殖したものに加えて、普通沈澱池や緩速ろ過池で自生することもある。偽空胞を持つものは、浮上し易く表面に集積する。付着性藍藻類は、河床の石や水道施設の壁面に付着して生息する他、緩速ろ過池ではろ過膜藻類として繁殖する。

表3 藍藻類の特徴と障害

藻類	特徴			主な属	繁殖	障害
藍藻類	浮遊性	群体形成	(空)	<i>Microcystis, Anabaena, Oscillatoria, Phormidium</i>	①②③	e f
				<i>Aphanisomenon, Aphanocapsa, Chroococcus</i>	①②③	b
		単細胞		<i>Synechococcus</i>	①②③	b
	付着性	群体形成		<i>Oscillatoria, Phormidium</i>	①②③	e f
特徴 (空):偽空胞 (寒):寒天質被膜 繁殖 ①:水源 ②:沈澱池 ③:緩速ろ過池 障害 a:ろ過閉塞 b:ろ過池からの漏出 e:異臭 f:健康影響物質						

(4)その他の藻類

緩速ろ過に関連するその他の藻類として、沈澱池や緩速ろ過池で赤潮状態になる藻類がある。これらは、鞭毛と眼点による走光性があり、水流に逆らって表面付近に集積し易いという特徴がある。障害としては異臭で、生ぐさ臭や魚臭がある。

表4 その他の藻類による障害

藻類	特徴			主な属	繁殖	障害
クリプト藻類	浮遊性	単細胞	(走)	<i>Cryptomonas</i>	①②③	e
黄金藻類	浮遊性	群体形成	(走)	<i>Synura, Uroglena</i>	①②③	e
		単細胞	(走)	<i>Mallomonas</i>	①②③	a e
渦鞭藻類	浮遊性	単細胞	(走)	<i>Ceratium, Gymnodinium, Peridinium</i>	①②③	a e
特徴 (走):走光性 繁殖 ①:水源 ②:沈澱池 ③:緩速ろ過池 障害 a:ろ過閉塞 e:異臭						

5. 藻類の影響の抑制方法⁷⁾⁸⁾⁹⁾

藻類に起因する障害が発生した場合、その影響を最小限とするために対応策を実施する必要がある。緩速ろ過関連施設における対応策には以下のようなものがある。

(1)原水中の藻類の低減化

①ろ過装置による除去

マイクロストレーナ、長毛ろ布ろ過により物理的に除去する方法がある。粗ろ過でも、ろ材表面に形成される生物膜による除去効果がある。

②普通沈澱池での除去

普通沈澱池では、原水中の付着性珪藻類などが沈澱により除去される。浮遊性藻類は除去されにくいか、逆に増殖することもある。

③薬剤処理

凝集剤：普通沈澱池の流入水に凝集剤を注入して沈澱による除去効果を高める。残存凝集剤が緩速ろ過池のろ過閉塞を引き起こすことがあるので、攪拌とフロッ

ク形成を確実に行う、沈澱時間を長くするなどの工夫が必要である。また、凝集剤により栄養塩のリン濃度が低下し、細菌類の細胞外高分子物質が増加してろ過閉塞が起こることがある。この場合は、緩速ろ過池のろ過砂の有効径を大きくするなどの対策が必要となる。

粗ろ過の前に、凝集剤を注入する方法もある。この場合、残存凝集剤は粗ろ過で除去される。

塩素剤：普通沈澱池の流入水に塩素注入を行い、藻類を死滅させて沈澱により除去する。残留塩素が緩速ろ過池の生物ろ過膜に影響を与えないように、低注入率若しくは間欠的に行う。また、藻体の有機物を前駆物質として増加する消毒副生成物の増加にも留意する。結合残留塩素による消毒は、藻類により効果的で細菌類への影響が少ないという特性があるが、それでも生物ろ過膜への影響には留意する必要がある。

硫酸銅：水道専用貯水池で、硫酸銅の散布を行う。硫酸銅は、藻類に対して特に有効で、薬効の持続性があるが、効果が表れるまでに1～2日の期間を要し、銅に強い藻類の繁殖を誘発するおそれもある。薬品注入は、障害発生前や発生初期に行うのがよく、必要な薬品を一度に投入する。水道専用貯水池でない場合には、魚への影響及び農作物への影響を考慮する。

(2) 普通沈澱池などでの繁殖抑制

① 普通沈澱池での増殖抑制

水の混合促進：沈澱池に停滞水塊が発生し藻類が繁殖するような場合には、表層付近の水が混合しやすいように、流入水量を増加させる、流入部及び流出部の構造を工夫するなどを行う。

遮光：水面に達する光を遮って、光合成による藻類の増殖を抑制する。

② 開渠などでの繁殖抑制

開渠や着水井で繁殖する付着性藻類の影響を抑制するために、定期的な清掃や遮光を行う。

(3) 緩速ろ過池での対策

① ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制

越流管からの排出：緩速ろ過池では、走光性がある藻類が表面に集結して繁殖する。このため、昼間に越流管からオーバーフローさせると比較的効率的に藻類を排出させることができる。

ろ過速度の増加：緩速ろ過池では生物ろ過膜に向かう下向き流速があるので、浮遊性藻類を浮上させないようにろ過速度を増加し、繁殖を抑制する。

ろ過池の清掃の強化：前のサイクルで繁殖した藻類の細胞が、砂層内やろ過池壁面に残っていると、ろ過開始後早い段階から藻類の繁殖が始まってしまう。このため、ろ過池の清掃時に藻類が残らないように削り取りや壁面の清掃を行う。

また、清掃後に下部から充水した水を排出する。

②ろ過膜藻類の繁殖抑制

ろ過池の清掃の強化：前のサイクルで繁殖した藻類の細胞が、砂層内やろ過池壁面に残っていると、ろ過開始後早い段階から藻類の繁殖が始まってしまう。このため、ろ過池の清掃時に藻類が残らないように削り取りや壁面の清掃を行う。また、清掃後に下部から充水した水を排出する。

③ろ過膜藻類の浮上対策

越流管からの排出：酸素の気泡が付着して浮上した藻類を、沈降し堆積する前に越流管から排出する。風向を考慮し、効率的に排出ができるように操作する。
網やレーキによる排出：浮上した藻類を網やレーキで集めて掬い上げて排出する。
ろ過池の清掃の工夫：藻類が浮上する際、直ちにろ過水濁度検出につながらないように、細菌叢を含む生物ろ過膜が砂層内まで形成されるようにする。このために、ろ過池の清掃の際、砂層の湿潤状態を可能な限り保つ。

④遊走子の漏出対策

越流管からの排出：緑藻類から放出される遊走子は走光性があるので、昼間に越流管からオーバーフローさせると効率的に藻類を排出させることができる。
網やレーキによる排出：遊走子を放出する可能性のある藻類を網やレーキで集めて掬い上げて排出する。

⑤異臭の対策

緩速ろ過水または浄水について、臭気試験またはかび臭物質の検査を実施する。対応が必要な場合、かび臭では粉末活性炭注入、その他の臭気では粉末活性炭の注入又は塩素注入の強化を行う。

⑥健康影響物質の対策

水源や水道施設で藍藻類が繁殖し、藍藻毒の混入の可能性がある場合、粉末活性炭の注入又は塩素注入の強化を行う。

(4)生物ろ過膜正常化のための対策

①小動物（ユスリカ、オタマジャクシ等）の制御

制御し難いが、ユスリカやカエルの卵を摂食する魚類などを活用する方法がある。

②ろ過池流入部での洗掘防止

大きいろ過池では流入部に整流壁を設ける。小さいろ過池では、流入部付近の砂層上にレンガやコンクリートブロックを敷く、流入部直下にろ過池水排水口を設けるなどの工夫をする。

③藻類浮上の影響抑制

細菌叢も含め生物ろ過膜が砂層内で比較的厚く形成されている場合には、濁質は生物ろ過膜で捕捉されるので影響は少なくなるので、生物ろ過膜の清掃時には、ろ過層内の水位を保つとともに可能な限り砂層の湿潤状態を保つようにする。

④壁面短絡流の影響抑制

壁面と砂層が解離しないように、生物ろ過膜の清掃時には、ろ過層内の水位を保つようにする。構造的には、斜壁にする方法があるが、垂直壁の場合は、壁面を粗面化する、勾配をつけるなどの方法がある。

⑤気泡の発生抑制

砂層内が負圧にならないように、砂層表面よりろ過水水位を高く保つ。ろ過膜清掃後は、砂層内の空気が抜けるように下部から充水する。また、光合成により過飽和となった水から酸素の気泡が発生しないように、下部集水装置内に滞留部分ができないようにする。

⑥生物ろ過膜の成熟促進

削り取りなどの清掃の際、砂層上部に形成された細菌叢を維持するために、可能な限り砂層が乾燥しないようにする。このため、砂層内水位を削り取り作業に支障のない程度で高く保つ、削り取り後速やかに充水するなどを行う。また、生物ろ過膜の成熟の判断は、ろ過水濁度や細菌除去率で行う。

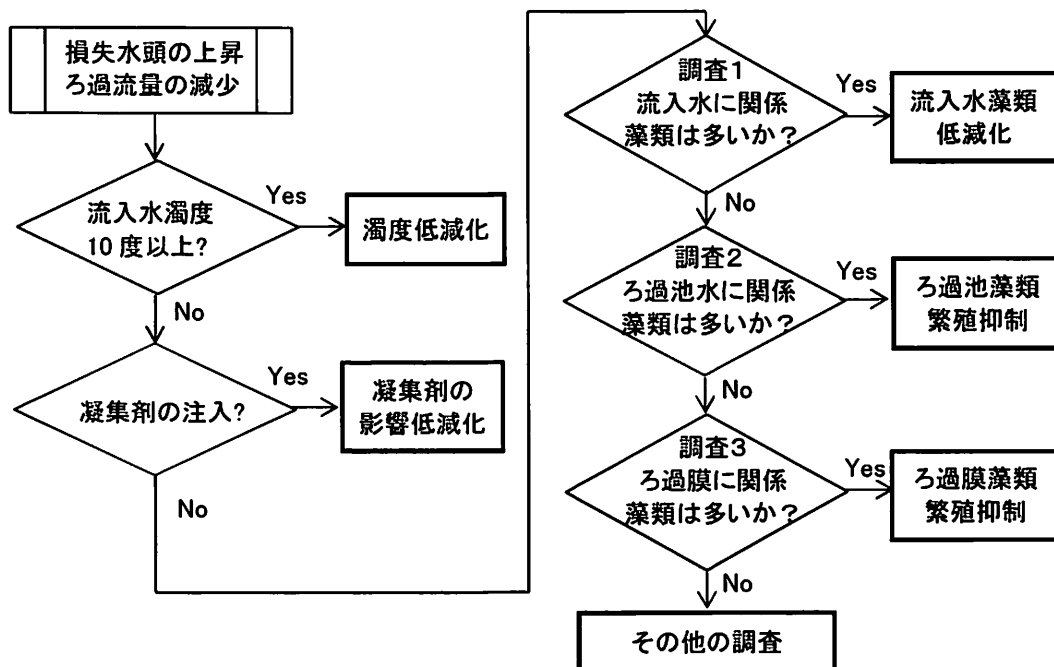
6. 障害の原因究明と対策

緩速ろ過池の障害は、日常的な運転管理指標の変化として顕在化する。それらには損失水頭の上昇又はろ過流量の減少、ろ過水濁度の検出、残留塩素の低下、浄水の異臭、藻類の繁殖などがある。また、障害発生時に行う調査を日常的に行うことにより、障害を事前に防止する対策を実施することが可能となる。

(1) 損失水頭の上昇（ろ過流量の減少）

損失水頭の上昇あるいはろ過流量の減少はろ過閉塞によるもので、緩速ろ過池ではこれらは不可逆的に起こるため、最終的にはろ過停止してろ過膜の削り取り等ろ過池の清掃を行うことになる。原因究明はこれらの操作と並行して行い、当該池のみならず他の池においても効果的な対策につなげるようにする（図4）。

原因究明の手順として、最初は、原水濁度の上昇や前処理としての凝集剤注人について調べる。原水濁度の低減化策としては、一時的には取水停止であるが、恒久的には沈澱池や粗ろ過池の設置が必要となる。凝集剤を注入する場合には、残存凝集剤によるろ過閉塞が起こる可能性があるため、その影響を除く対策が必要となる。また、栄養塩のリンの減少による細菌類の細胞外高分子物質の増加によるろ過閉塞の場合は、有効径の大きいろ過砂を使用する方法がある。藻類が原因の場合は、顕微鏡観察により原因藻類を推定し、5で述べた対策を行う。これらによっても原因が究明できない場合には、その他の調査に示した砂層の粒度分布や汚染調査を行う。



調査1～3:それぞれ流入水、ろ過池水、生物ろ過膜の顕微鏡観察を行い、原因藻類を特定する。

その他の調査:ろ過砂粒度分布調査、ろ過層内汚染調査など

対策	内容
濁度低減化	一時的取水停止、普通沈澱池、粗ろ過池、凝集剤注入
凝集剤の影響低減化	凝集剤注入後沈澱時間の延長、粗ろ過池、ろ過砂有効径増加
流入水藻類低減化	5(1) ろ過装置、普通沈澱池、薬剤処理 5(2) 普通沈澱池繁殖抑制、開渠繁殖抑制
ろ過池藻類繁殖抑制	5(3) ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制
ろ過膜藻類繁殖抑制	5(3) ろ過膜藻類の繁殖抑制

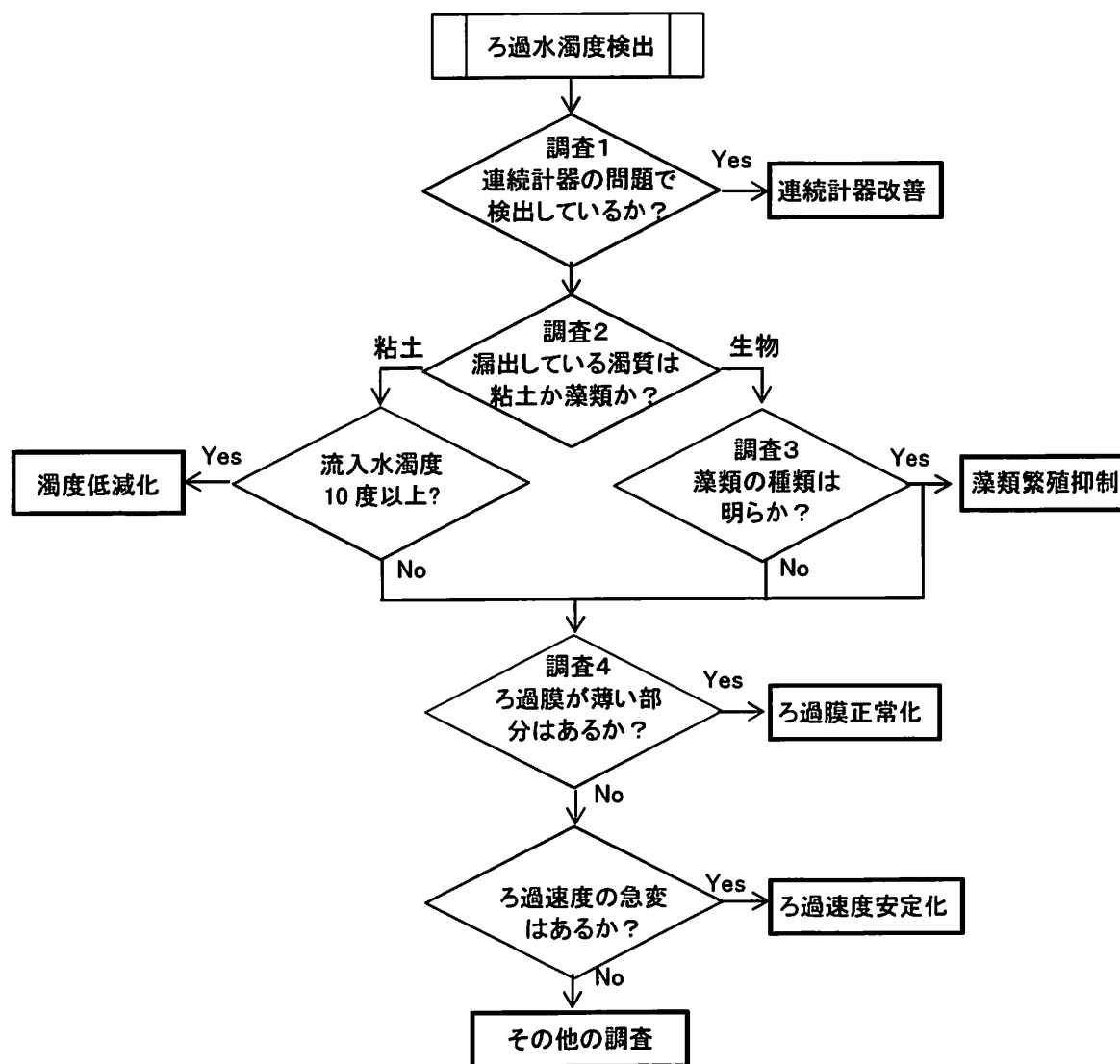
図4 ろ過閉塞が発生した場合の原因究明と対策

(2) ろ過水濁度の検出

ろ過水濁度は、クリプトスポリジウム等対策指針で求められている 0.1 度以下の維持を考慮し、0.1 度あるいはより厳しい管理目標値が設定されている場合はその値を超えた場合を濁度検出とする。ろ過水濁度が検出されると、応急対策としてはろ過放水があるが、並行して図5に示したような原因究明のための調査と対策を行う。

連続計器で計測する場合、濁度の誤検出（光合成による溶存酸素の気泡:日周変動あり、連続計器までの配管内に付着した生物膜の剥離：管内流速変動時に発生）の可能性があるため、卓上型濁度計との実測値と比較する。次に、顕微鏡観察により濁質が粘土によるものか藻類によるものかを判定し、粘土であれば、流入水濁度の低減化の対応を図る。藻類

の場合は、原因藻類を特定し5で述べた対策を行う。遊走子の場合、夜間にろ過膜を通過する水に濁度上昇が起きる可能性がある。付着藻類の浮上に伴うろ過膜損傷の場合は、昼間にろ過膜を通過する水に濁度上昇が起こる可能性がある。ろ過膜の状態による濁度検出への対応は、ろ過膜正常化及びろ過速度安定化で、生物あるいは粘土の流出に対し共通のものとなる。



調査 1:ろ過水井等から直接採水して卓上型濁度計で測定し、連続計器の計測値と比較する。

調査 2:ろ過水 1~2L をフィルターでろ過し、フィルター上に集まった濁質を顕微鏡観察する。

調査 3:ろ過水、ろ過池水、ろ過膜藻類を顕微鏡観察する。ろ過水の藻類が判定しにくい場合、遊走子を放出する藻類がろ過池で繁殖しているか確認する。

調査 4:ろ過膜の状態を観察し、付着藻類の浮上、生物ろ過膜が薄い部分の存在、それと小動物(ユスリカ、オタマジャクシ、ミズミズ等)との関係、気泡発生等を調べる。ろ過池に水がある状態とともに落水直後のろ過膜や砂層の状態も調べる。浮上した藻類は顕微鏡で種類を調べる。

その他の調査:ろ過砂粒度分布調査、ろ過層内汚染調査、補砂時に砂層砂利層境界層の汚染調査。

対策	内容
連続計器改善	気泡発生を抑制する加圧式セルの濁度計の採用、濁度計用配管延長の短縮化、濁度計用配管の清掃
濁度低減化	一時的取水停止、普通沈澱池、粗ろ過池、凝集剤注入
藻類繁殖抑制	<ul style="list-style-type: none"> ・藻類の繁殖場所、種類により以下の対策を行う。 5(1) ろ過装置、普通沈澱池、薬剤処理 5(2) 普通沈澱池繁殖抑制、開渠繁殖抑制 5(3) ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制、ろ過膜藻類の繁殖抑制 ・遊走子の可能性がある場合 5(3) 遊走子の漏出対策
ろ過膜正常化	<ul style="list-style-type: none"> ・小動物の補食によるもの 5(4) 小動物の制御 ・流入部の洗掘によるもの 5(4) 洗掘防止 ・藻類浮上によるろ過膜損傷 5(3) ろ過膜藻類の繁殖抑制、5(4) 藻類浮上の影響抑制 ・気泡発生によるろ過膜損傷 5(4) 気泡の発生抑制 ・壁面短絡流によるもの 5(4) 壁面短絡流の影響抑制 ・その他 5(4) 生物ろ過膜の成熟促進
ろ過速度安定化	ろ過流量の急変:弁操作の安定化、5(4) 小動物の制御、洗掘防止、ろ過膜藻類の繁殖抑制、気泡の発生抑制
その他	・砂層砂利層の境界層の汚染:砂利層の粒度調整

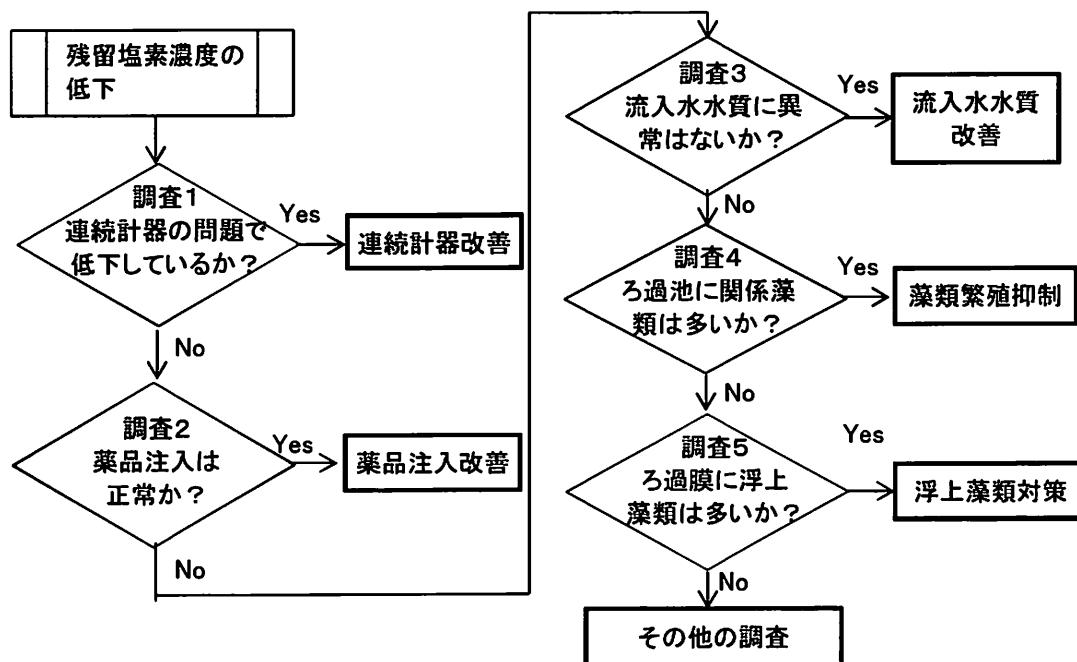
図5 ろ過水濁度検出の場合の原因究明と対策

(3) 残留塩素濃度の低下

日常的に残留塩素が安定的に制御されている場合は、0.1mg/Lの低下を目安として、原因調査を行う。なお、給水区域内で0.1mg/L以上を維持するために厳しい管理が必要な場合は、より厳しい目標値を設定する。図6に示す原因究明のための調査と対策を行う。

最初に、連続計器が正確な値を示しているかを携帯型残留塩素計で確認し、必要であれば校正を行う。次に、薬品注入が正常であることを確認し、問題があれば必要な対応を行う。連続計器及び薬品注入に問題がない場合、応急対策として塩素注入率を増加させるが、並行して図6に示した原因究明と対策を実施する。

流入水水質に変化がある場合には、一時的には取水停止等で対応し、恒久的には前処理を検討する。ろ過池の藻類が多い場合は、藻類抑制策及びろ過膜正常化策を実施する。藻類が浮上し、その後集積して沈降したことによる腐敗が原因でアンモニアやマンガンを溶出している場合には、5で述べた必要な対策を実施する。



調査 1: 携帯型残留塩素計で測定し、連続計器の計測値と比較する。

調査 2: 薬品注入量、薬品注入ポンプの稼働、薬注配管の閉塞、次亜塩素酸ナトリウムの劣化を確認する。

調査 3: 流入水の塩素消費物質（アンモニア、有機物、マンガ、藻類等）を測定する。

調査 4: ろ過水の藻類を顕微鏡観察する。ろ過水の有機物を測定する。

調査 5: ろ過水の浮上藻類を顕微鏡観察する。ろ過水のアンモニア、マンガンを測定する。

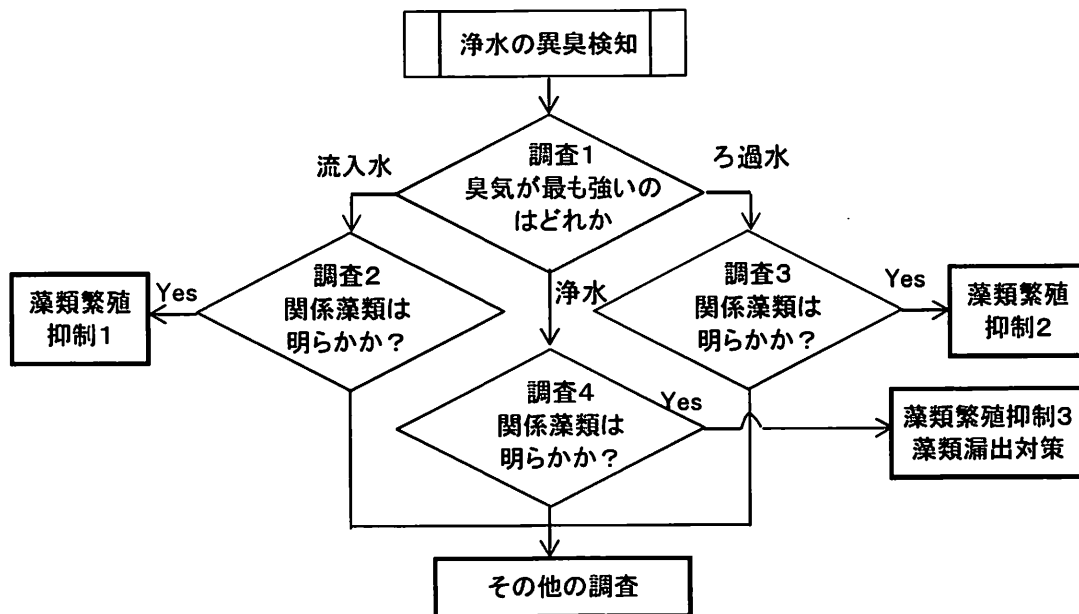
その他の調査: ろ過層内汚染調査。

対策	内容
連続計器改善	残留塩素計の校正
薬品注入改善	注入設備の洗浄、修繕、次亜塩素酸ナトリウム溶液の取替
流入水水質改善	・アンモニア、有機物、マンガ等によるもの 一時的取水停止、普通沈澱池、粗ろ過池、凝集剤注入 ・藻類によるもの 5(1) ろ過装置、普通沈澱池、薬剤処理 5(2) 普通沈澱池繁殖抑制、開渠繁殖抑制
藻類繁殖抑制	・藻類の繁殖抑制 5(3) ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制、ろ過膜藻類の繁殖抑制 5(3) 遊走子の漏出対策 ・ろ過膜正常化
浮上藻類対策	5(4) 藻類浮上の影響抑制

図 6 残留塩素濃度低下の場合の原因究明と対策

(4) 浄水の異臭検知

水道水の臭気には種々あるが、ここでは藻類に起因すると考えられるかび臭、生ぐさ臭、魚臭、青草臭を対象とする。応急対応として粉末活性炭の注入があるが、流入水に原因がある場合に限られる。生ぐさ臭、魚臭、青草臭に対しては塩素注入強化がある。また、かび臭の場合、水質基準値が設定されているので、ジェオスミンと 2-メチルイソボルネオールの検査を実施する必要がある。原因究明と対策は、関係する藻類を特定しそれを除く対策を行う (図 7)。



調査 1: 臭気試験を実施する。かび臭の場合は、かび臭物質の検査を行う。

調査 2: 流入水の顕微鏡観察、水源及び水道施設を調査し、関係する藻類を確認する。

調査 3: 緩速ろ過池内を調査し、関係する藻類の繁殖を確認する。

調査 4: ろ過水の藻類を顕微鏡観察する。

その他の調査: ろ過水井の確認等

対策	内容
藻類繁殖抑制 1	<ul style="list-style-type: none"> ・水源で繁殖している場合 今後の動向予測 ・水道施設で繁殖している場合 5(2) 普通沈澱池繁殖抑制、開渠繁殖抑制
藻類繁殖抑制2	<ul style="list-style-type: none"> ・藻類の繁殖抑制 5(3) ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制、ろ過膜藻類の繁殖抑制
藻類繁殖抑制3	<ul style="list-style-type: none"> ・藻類の繁殖抑制 5(3) ろ過池水での浮遊性藻類の繁殖抑制、ろ過膜藻類の繁殖抑制 5(3) 遊走子の漏出対策 ・ろ過膜正常化

図 7 浄水の異臭検知の場合の原因究明と対策

(5) 藻類の繁殖

流入水に含まれる藻類や緩速ろ過池で藻類の繁殖が多くなると、時間とともに(1)～(4)で述べた障害が健全化するおそれがある。このため、ろ過池の状態を把握し、顕微鏡観察により藻類を特定し、事前に対策を実施することにより、障害を未然に防ぐ必要がある。藻類の種類を顕微鏡観察で正確に判定するには専門的な知識が必要となるが、緩速ろ過池で繁殖し易い藻類の外観と顕微鏡写真の検索図を作成しておく、日常の運転管理の中で有用なものとなる。(別添1)(別添2)

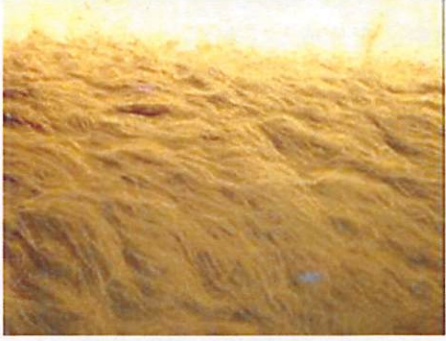
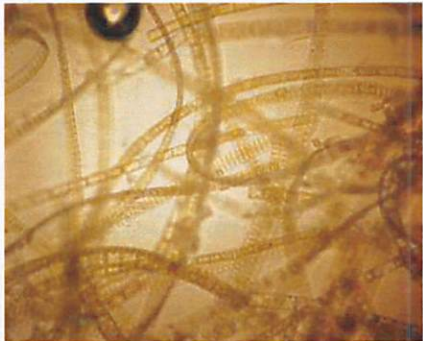
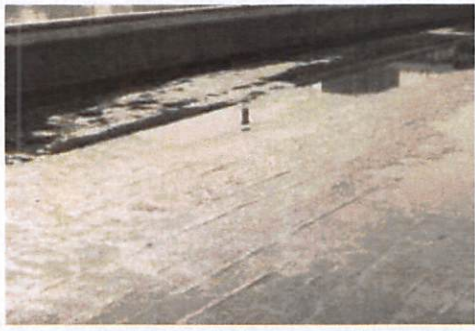

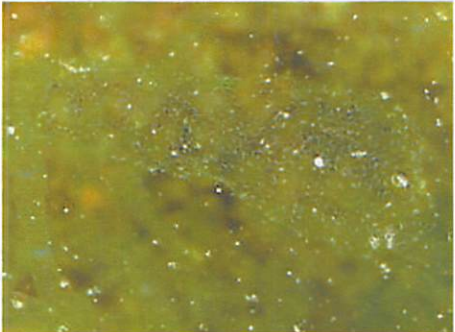
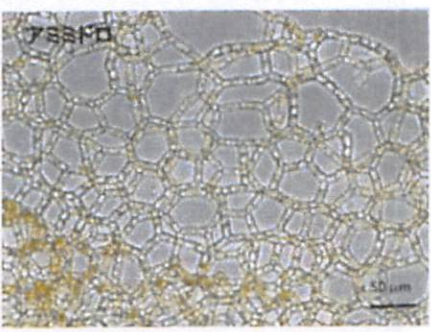
7. まとめ


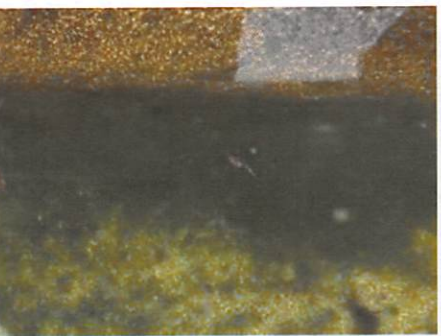
緩速ろ過池では種々の藻類が繁殖し、浄化機能に寄与する一方で、様々な障害の原因となっている。顕在化する障害としては、ろ過閉塞、ろ過水濁度検出、残留塩素の低下、異臭などがあるが、原因藻類を特定することで適切な対策を実施することができる。また、あらかじめ藻類の消長を把握することで、障害を未然に防ぐことも可能である。

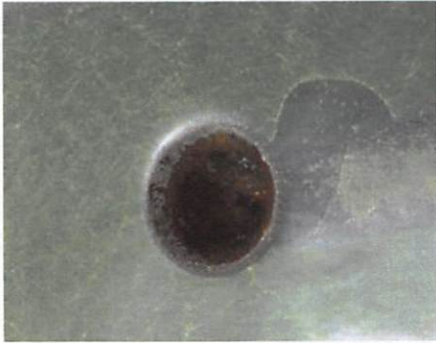
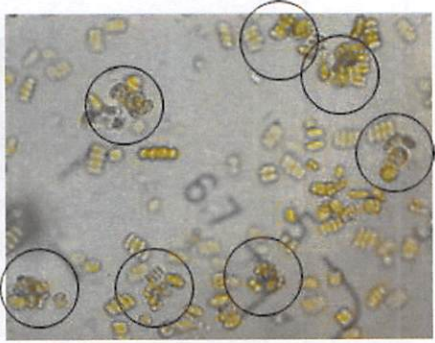
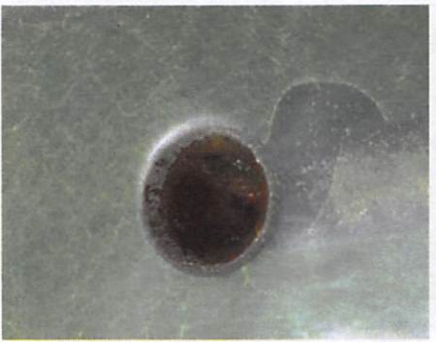
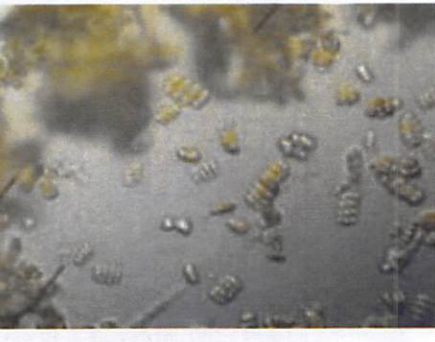
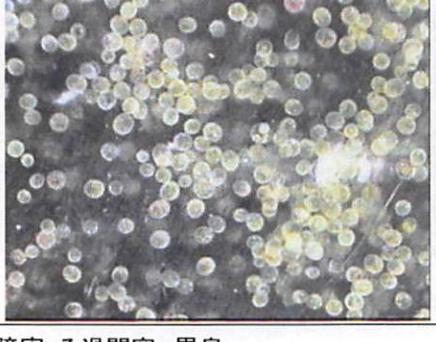
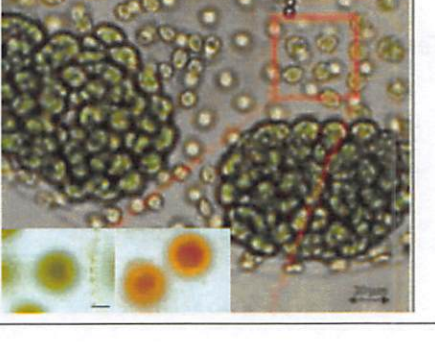
参考文献

- 1) Urano, S. et al. (1989): Eutrophication of reservoirs in Kiso River, Technical papers of Water Nagoya '89 (ASPAC IWSA), 420.
- 2) 坂本充(1976): 生態遷移, 共立出版.
- 3) 森下郁子(1983): ダム湖の生態学, 山海堂.
- 4) 谷田一三ら編(2010): ダム湖・ダム河川の生態系と管理, 名古屋大学出版会.
- 5) 伊佐治知明(2005): 緩速ろ過池の浄化機能の研究 その5 鳥居松沈殿池の水質問題, 名古屋市上下水道局水質調査報告, 206.
- 6) 伊佐治知明(2005): 緩速ろ過池の浄化機能の研究 その4 緩速ろ過池の水質問題, 名古屋市上下水道局水質調査報告, 199.
- 7) 日本水道協会(2006): 生物障害を起こさないための浄水処理の手引き.
- 8) 日本水道協会(2008): 日本の水道生物-写真と解説-改訂版.
- 9) 佐藤敦久ら編(1996): 上水道における藻類障害-安全で良質な水道水を求めて-, 技報堂出版.

(別添1) 緩速ろ過池でみられる藻類と障害のリストの例

藻類名	外観	顕微鏡観察
チャヅツ ケイソウ <i>Melosira</i> 珪藻類 付着性		
障害: 浮上後沈降して腐敗、浮上時にろ過膜を損傷して、濁質が漏出		
クチビル ケイソウ <i>Cymbella</i> 珪藻類 付着性		
障害: ろ過閉塞		
アミミドロ <i>Hydrodictyon</i> 緑藻類 付着性		
障害: 娘細胞や遊走子が漏出、浮上後沈降して腐敗		

藻類名	外観	顕微鏡観察
<p>サヤミドロ</p> <p><i>Oedogonium</i></p> <p>緑藻類 付着性</p>	<p>鮮やかな緑色。円筒状の細胞が一行に連なった糸状体で分枝しない。所々に球形のふくらみがある。基部の細胞には仮根があって他のものに付着する。水温が高く、光が十分な条件が適しており、夏季を中心に繁殖。成長した群体から遊走子が一斉に放出される。細胞の幅 20 μm、長さ 50 μm 程度。</p> 	
<p>障害: ろ過閉塞、浮上後沈降して腐敗、浮上時にろ過膜を損傷、遊走子が漏出</p>		
<p>アオミドロ</p> <p><i>Spirogyra</i></p> <p>緑藻類 付着性</p>	<p>鮮やかな緑色。細長い細胞がつながった糸状の藻類。細胞内でリボン状の葉緑体がらせん状に巻いて並んでいる。付着藻類だが、固着していない。春から秋にかけて、水温の高い水中で繁殖。細胞の長さ 40~200 μm、直径 10~50 μm。</p> 	
<p>障害: ろ過閉塞、浮上後沈降して腐敗</p>		
<p>ヨツメモ</p> <p><i>Tetraspora</i></p> <p>緑藻類 付着性 浮遊性</p>	<p>薄緑色。球形の細胞が寒天質基質に包まれている。寒天質基質は壊れやすく、水中から取り出すとちぎれてしまう。付着性又は浮遊性で、年間を通して生育する。成長した群体から遊走子が一斉に放出される。細胞の直径は 5~15 μm。</p> 	
<p>障害: ろ過閉塞、遊走子が漏出</p>		

藻類名	外観	顕微鏡観察
スファエロキスチス <i>Sphaerocystis</i> 緑藻類 浮遊性		<p data-bbox="389 349 1313 488">緑色。4個、8個、16個まれに32個の球形の細胞がまばらに集まって、透明な寒天質基質に包まれた球形の群体を形成する。浮遊性の藻類であるが、粘性のある寒天質基質に包まれているので、砂層に張り付いて生物ろ過膜を形成することがあり、除濁に寄与する。細胞の直径 5~12 μm。</p> 
<p>障害: ろ過閉塞</p>		
イカダモ <i>Scenedesmus</i> 緑藻類 浮遊性		<p data-bbox="389 913 1313 1052">緑色。通常4個、まれには2、8、16個の細胞が、横一列に並んだり交互になつたりして、いかだ状に並んだ群体を作る。浮遊性の藻類であるが、粘性のある寒天質基質に包まれているものもあり、砂層に張り付いて生物ろ過膜を形成し、除濁に寄与する。細胞の幅 10 μm、長さ 20 μm 以下。</p> 
<p>障害: ろ過閉塞、漏出、異臭</p>		
オオヒゲマワリ <i>Volvox</i> 緑藻類 浮遊性		<p data-bbox="389 1469 1313 1608">緑色。2000個の球形などの細胞が球の表面に規則正しく配列して、内部は中空になっている。群体の中に新しい群体(娘群体)が複数みられる場合もある。走光性のある浮遊性藻類で、鞭毛で回転している。有性生殖で作られる接合子がオレンジ色のものもある。細胞の直径 8~10 μm、群体の直径は 500~800 μm。</p> 
<p>障害: ろ過閉塞、異臭</p>		

藻類名	外観	顕微鏡観察
<p>マイクロキスチス</p> <p><i>Microcystis</i></p> <p>藍藻類 浮遊性</p>	<p>淡～濃青緑色。細胞は非常に小さな球形で、寒天質の基質の中に密に集まって群体を作る。群体の形は、球状、楕円体状などいろいろで、老熟したものではところどころ破れて網目状になる。夏から秋にかけての高水温期に著しく繁殖して、水の華(アオコ)をつくる。細胞の直径 2.5～9.5 μm (<i>Microcystis aeruginosa</i>)。</p> 	
<p>障害: 藍藻毒</p>		
<p>アナバネ</p> <p><i>Anabaena</i></p> <p>藍藻類 浮遊性</p>	<p>淡～濃青緑色。まっすぐ、半円形に湾曲、らせん状に巻くものなど様々な糸状体の群体を作る。細胞は、球形または樽形などで、ガス砲があるものは浮遊性になる。やや大きな、異質細胞と休眠胞子がある。夏から秋にかけての高水温期に著しく繁殖して、水の華をつくる。細胞の直径 11～15 μm (<i>Anabaena spiroides</i>)。</p> 	
<p>障害: かび臭物質、藍藻毒</p>		
<p>ユレモ</p> <p><i>Oscillatoria</i></p> <p>藍藻類 浮遊性 付着性</p>	<p>青藍色。円柱状または円盤状の細胞が糸状体をつくる。糸状体は、単独又は塊状で、運動性があり、光が当り易くなるように左右に揺れる。先端の細胞の形は様々で、やや細くなることもある。浮遊性のものは、夏から秋にかけて著しく繁殖して、水の華をつくる。付着性のものもある。細胞の幅 4～10 μm (<i>Oscillatoria tenuis</i>)。</p> 	
<p>障害: かび臭物質、藍藻毒</p>		

(別添2) 藻類情報の例

[メロシラ]

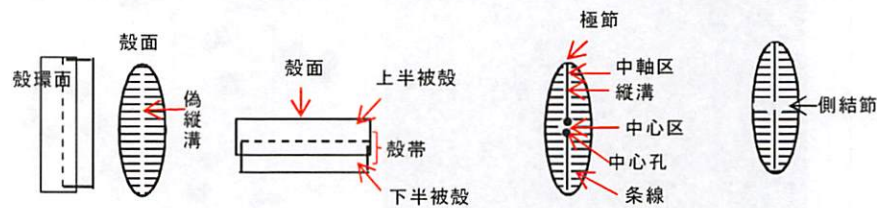
1 種名

(和名) チャツツケイソウ : 珪藻類

(学名) *Melosira varians*

2 形態

形状：細胞は円筒形で、殻面で直線状に連結した糸状の群体を形成する。ほとんどの場合殻環面が見え、殻環面中央の細い線は上下2つの被殻の境目となる。

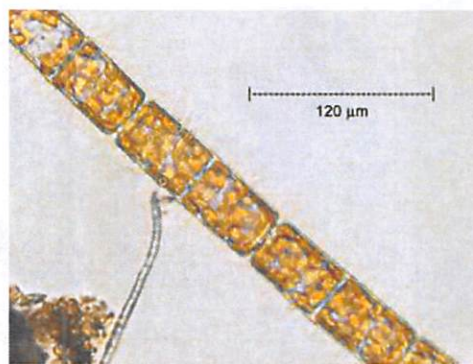


大きさ：細胞の直径は8~35 μm 、長さ18~26 μm 。

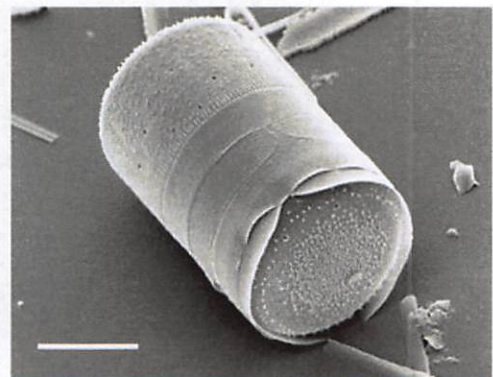
色：黄褐色

葉緑体の様子：葉緑体は薄板状で複数ある。

附着又は浮遊の様子：附着藻類。一時的に浮遊生活することがある。



[メロシラ・バリアンス]a



[走査電子顕微鏡画像]b

a : <https://www.inaturalist.org/observations/359645>

b : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Diatoms.png>

3 生理

無性生殖：細胞分裂によって糸状群体が伸長する。母細胞の半被殻が2つの娘細胞の上半被殻になるので、下半被殻からできた娘細胞は母細胞より小さくなる。

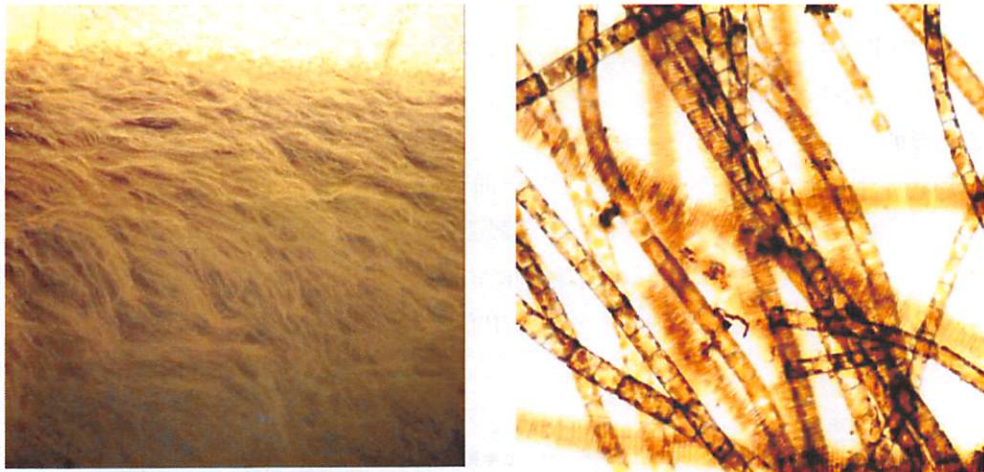
有性生殖：細胞分裂を繰り返すと細胞が小さくなるので、有性生殖により大きさを回復する。減数分裂によって卵細胞と精子が作られ、それらが接合して増大胞子を形成する。

4 生態

環境：年間を通して生育し、湖沼、河川などのいたるところで普通にみられる。

水道施設：原水開渠や沈澱池の壁面に付着して生息することがある。

緩速ろ過池：ろ過膜藻類として繁殖。糸状の群体のため、損失水頭の上昇が少ない立体的な生物ろ過膜を形成する。藻体に濁質を付着させる特徴があり、効率的な除濁に寄与する。



[緩速ろ過池での繁殖]

5 緩速ろ過での障害

浮上後沈降して腐敗：昼間、光合成により群体に微細酸素が付着すると、その浮力によって表面付近まで浮上する。水面付近で酸素が大気中に揮散すると、浮力が失われて沈降する。この場合、ろ過池の水流や風向により、浮上した藻類が特定の場所に集まり、ろ過膜上に厚く堆積することがある。堆積物の内部には水が通り難く、溶存酸素の供給が少なくなり腐敗が始まり、部分的ではあるが、アンモニア態窒素やマンガン²⁺の溶出が起こる。これらは、残留塩素の低下や黒水障害につながる。

ろ過水濁度検出：群体に付着部があり、浮上時にろ過砂とともにろ過膜を剥がして持ち上げてしまうことがある。この部分では、濁質が砂層内に侵入しやすくなり、ろ過水濁度検出に繋がる可能性がある。この場合、昼間に生物ろ過膜を通過するろ過水で濁度が検出される。

6 障害への対処方法

藻体の排出（オーバーフロー、掬い上げ）：昼間に光合成により浮遊することが多いので、ろ過池での浮遊が目立ってきたら、網やレーキで水から掬い上げて除去する。また、越流管を活用してオーバーフローにより除去する。

ろ過膜の清掃の徹底：削り取りの際、砂層内に藻類が残存しないように清掃する。開渠で繁殖する藻類がろ過池への供給源になっている場合は、繁殖時に開渠の壁面の清掃を行う。

ろ過層の湿潤状態の維持：*Melosira varians* が浮上した際にも、ろ過膜剥離の影響を少なく

するために、生物ろ過膜が砂層内まで形成されるようにする。このため、ろ過池の清掃の際、砂層の湿潤状態を可能な限り保つ。

[キンベラ]

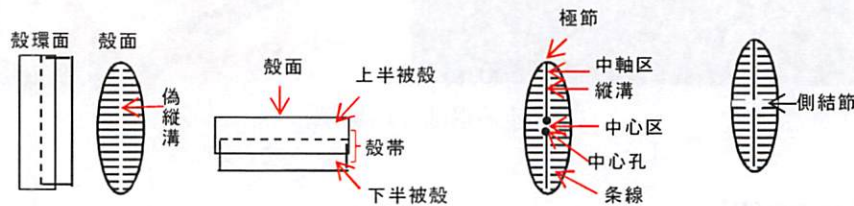
1 属名

(和名) クチビルケイソウ : 珪藻類

(学名) *Cymbella*

2 形態

形状：細胞は、殻面が長軸に対して湾曲、殻環面は長方形で中間帯や隔壁を持たない。縦溝は殻面の内縁近くであり、殻面にある。中軸区と中心区は明瞭に分かる。条線は放射状に並んだ点紋で、種類によっては中心区の内側に明瞭な点紋を有する。種の分類は、殻面の形、大きさ、中心区の点紋、条線による。



大きさ：下表

色：黄褐色

葉緑体の様子：

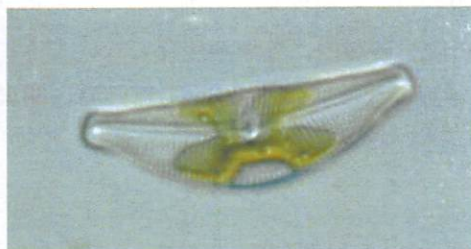
付着又は浮遊の様子：付着藻類。粘液質の柄で他のものに付着したり、粘質の鞘に入っていたり、単独で浮遊することもある。

種名	特徴	
<i>C. prostarata</i>	殻面	殻面は半月形で背側は大きく外に湾曲、中心区に孤立した点紋はない。
	大きさ	長さ 20~100 μm、幅 10~30 μm
	条線	10 μm に 7~10 本
<i>C. sinuata</i>	殻面	殻面は左右不相称、楕円形で背側は僅かに湾曲、腹側はまっすぐか弱くふくれる。中軸区は狭く、中心区は偏在し腹縁まで達する。条線は放射状。背側の中心区に孤立した点紋。
	大きさ	長さ 10~14 μm、幅 4.5~6 μm
	条線	10 μm に 9~12 本
<i>C. tumida</i>	殻面	殻面はほぼ半月形、背側が湾曲、腹側はまっすぐで中央部が少しふくれる。両端が乳頭状に突出。中軸区は狭く、中心区は大きく円形に近い。腹側の中心区に1個の点紋、背側には「へ」の字の紋。
	大きさ	長さ 40~105 μm、幅 15~23 μm
	条線	10 μm に 8~10 本

C. <i>ventricosa</i>	殻面	殻面は半月形または三日月形、腹側はまっすぐか少しふくれる。両端は尖円から広円まで変化あり。中軸区は狭く、中心区はわずかに広がる。条線は細かい点紋で放射状。
	大きさ	長さ 10~40 μm 、幅 5~12 μm
	条線	10 μm に 12~18 本
C. <i>minuta</i>	殻面	殻面は半月形、腹側はまっすぐか少しふくれる。縦溝はほぼまっすぐで、腹縁近くを走る。中心区はほとんど認められない。条線は 1 本の線に見え、わずかに放射状で、腹側の端部で逆放射する。
	大きさ	長さ 18~30 μm 、幅 5~18 μm
	条線	10 μm に 10~15 本



[C. sinuata] a



[C. tumida] b



[C. minuta] c

a: <http://www.lbm.go.jp/ohtsuka/atlas/semphotos/reisinuatas.jpg>

b: <http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB7/PCD0006/htmls/79.html>

c: http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/Heterokontophyta/Raphidineae/Cymbella/minuta/sp_06.jpg

3 生理

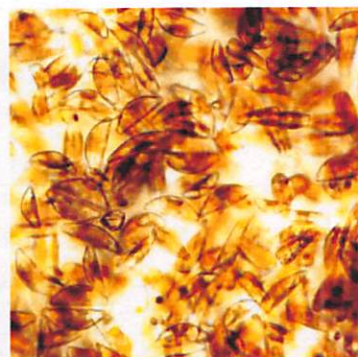
無性生殖：細胞分裂によって増える。母細胞の半被殻が 2 つの娘細胞の上半被殻になるので、下半被殻からできた娘細胞は母細胞より小さくなる。

有性生殖：細胞分裂を繰り返すと細胞が小さくなるので、有性生殖により大きさを回復する。被殻内に同型配偶子が作られ、それらがアメーバ運動して接合して増大胞子を形成する。

4 生態

環境：湖沼、河川などのいたるところで普通にみられる。

緩速ろ過池：ろ過膜藻類として繁殖。平面的な生物ろ過膜を形成するので、除濁効果は高いが損失水頭は上昇し易い。

[緩速ろ過池での繁殖 *C. minuta*]

5 緩速ろ過での障害

ろ過閉塞：生物ろ過膜での繁殖が進むとろ過閉塞の原因となる。

6 障害への対処方法

ろ過停止：ろ過閉塞が発生した場合は、ろ過停止して削り取りなどの洗浄を行う。

ろ過膜の清掃の徹底：削り取りの際、砂層内に藻類が残存しないように清掃する。開渠で繁殖する藻類がろ過池への供給源になっている場合は、繁殖時に開渠の壁面の清掃を行う。

[アミミドロ]

1 属名

(和名) アミミドロ : 緑藻類

(学名) *Hydrodictyon*

2 形態

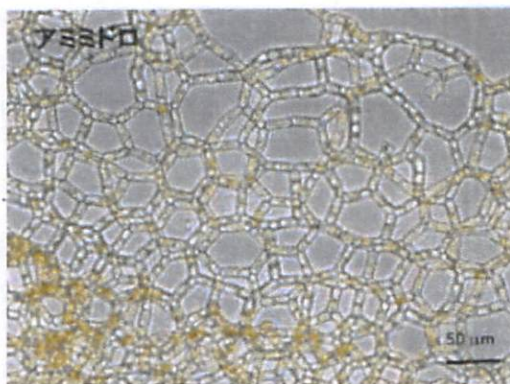
形状：五角形か六角形の網目構造で、金網を円筒形の袋につなげたようなネット状の群体を形成する。

大きさ：網目の各辺が1個の円筒形の細胞で、その大きさは非常に差があり、長さ1.5cm、幅250 μ mになるものもある。群体も長さ30cmに達するものがあり、肉眼でも同定できる。

色：鮮やかな黄緑色

葉緑体の様子：最初は単核であるが、成長に伴って次第に大きくなり内部は多核になる。

付着又は浮遊の様子：付着藻類であるが、固着のための構造はない。



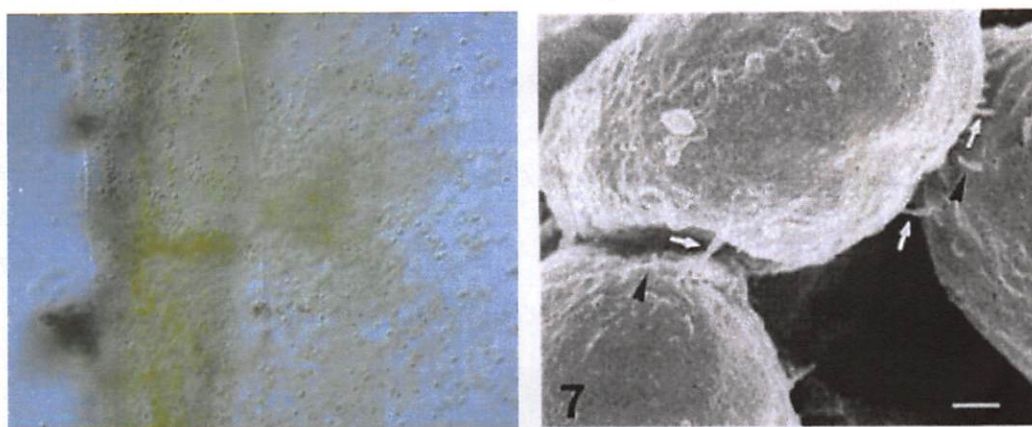
[アミミドロ]

3 生理

主として無性生殖で増えるが、有性生殖で増えることもある。3回の無性生殖の後に有性生殖が起こるとの報告もある。

無性生殖：水温が高い時期、大きく成長した群体で、細胞内に2本の鞭毛を持つ卵形の遊走子(3~4 μ m)が多数できる。遊走子の形成は、光が到達する朝の時間帯に起こる。これらの遊走子は、糸状の突起物で五角形または六角形の空隙を作るように連結され、鞭毛が失われて細胞壁が作られ、一辺7~10 μ mの娘細胞となる。これらの娘細胞が親細胞内に多数できると、やがて親細胞が破れて、数百~数万個に及ぶ娘細胞や遊走子が一斉に放出される。その後、網目状に結合し群体が形成される。

有性生殖：遊走子より小さい同形配偶子が多数作られ、親細胞にできた穴から水中に放出される。2つの配偶子が接合し、直角の細胞壁をもつ接合子が作られる。一定の休眠後、2~5個の無性生殖より大きい接合子がつくられ、成長して多角形となる。その後接合子の細胞質が分裂し鞭毛が脱落して新しい群体が作られる。

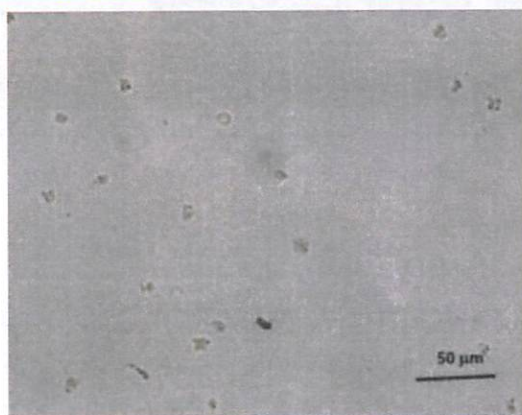


[娘細胞の放出] a

[娘細胞の電子顕微鏡写真] b

a : <http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB2/PCD2364/htmls/69.html>

b : https://www.jstage.jst.go.jp/article/plmorphol1989/10/1/10_1_14/_pdf



[娘細胞]

4 生態

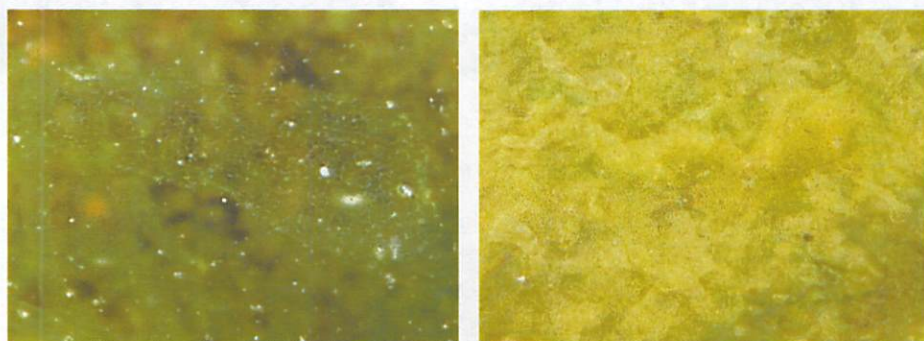
環境：水温が高く（25℃）、光が十分な条件が適しており、夏季を中心に、水田や浅く流れの緩やかな水域で生育する。固着のための構造はなく、浮遊又は沈降あるいはオオカナダモなど他の藻類に絡まって生息する。繁殖には、窒素及びリンが必須であるが、特にリンは不可欠である。

緩速ろ過池：ろ過膜藻類として繁殖。光合成により発生した酸素の微細気泡は、ネットが小さいと藻体に付着され易く、大きいと付着されにくいので、若い群体は浮遊しやすく、成長した群体は沈み易い傾向がある。

5 緩速ろ過池での障害

集積による腐敗：昼間は、光合成により群体に微細酸素が付着すると水面付近に浮遊するが、夜間は沈降してろ過膜付近に集積する。この集積量が多いと、緩速ろ過池の生物ろ過膜が嫌気状態になり、腐敗臭、アンモニアやマンガンの溶出の原因となる。若い群体に比べて、大きく成長した群体は酸素が抜け易く、昼間でも浮遊しないことがある。

遊走子や娘細胞の放出によるろ過水濁度検出：ろ過膜付近で、大きく成長した群体から一斉に娘細胞や遊走子が放出されると、昼間は光合成により浮遊しているが、夜間は水流と共にろ過膜付近に集積する。放出される娘細胞や遊走子は、1細胞当り数百～数万個にのぼり、全体ではろ過膜に大きな負荷となる。この場合、ろ過膜の薄い部分があれば、そこからろ過水に混入し、濁度検出となる。薄い部分がなくても、緩速ろ過の粒子除去率99～99.9%を考慮すると、ろ過池全体からの漏出もあり得る。



[緩速ろ過池でのアミミドロの繁殖]

6 障害への対処方法

(1) 緩速ろ過池での対処

藻体の排出（オーバーフロー、掬い上げ）：アミミドロは固着構造を持たず、昼間に光合成により浮遊することが多いので、ろ過池での浮遊が目立ってきたら、網やレーキで水から掬い上げて除去する。また、越流管を活用してオーバーフローにより除去する。成長した群体は浮遊しにくく、その成長した群体から濁度の原因となる娘細胞や遊走子が

放出されるので、あまり多い場合は水中の藻体も可能な限り掬い上げる。ろ過水濁度が検出される場合は、ろ過放水に切り替えるとともに、オーバーフローにより娘細胞や遊走子を出来る限り排出する。

生物ろ過膜正常化：生物ろ過膜の薄い部分が形成されないように、その原因に応じて、小動物の制御、ろ過池流入部での洗掘防止、藻類浮上の影響抑制、壁面短絡流の影響抑制、気泡の発生抑制を行う。

ろ過膜の清掃の徹底：削り取りの際、砂層内に藻類が残存しないように清掃する。逆張りにより充水した水に藻類が残っている場合には排水する。開渠で繁殖する藻類がろ過池への供給源になっている場合は、繁殖時に開渠の壁面の清掃を行う。

(2) 水源貯水池での対処

自然薬剤による制御：大麦蘖の抽出液が植物プランクトンや糸状藻類の抑制に効果があるとされ、水道原水の貯水池にも海外で使用された例がある。

化学薬剤の使用：硫酸銅では1mg/Lで殺藻できる。硫酸銅は、藻類に対して特に有効で、薬効の持続性があるが、効果が表れるまでに1~2日の期間を要し、銅に強い藻類の繁殖を誘発するおそれもある。薬品注入は、障害発生前や発生初期に行うのがよく、必要な薬品を一度に投入する。水道専用貯水池でない場合には、魚への影響及び農作物への影響を考慮する。

生物による制御：タニシ、コモチカワウツボ等の巻貝がアミミドロを食べることが知られている。魚類は摂食しない。

[ヨツメモ]

1 属名

(和名) ヨツメモ : 緑藻類

(学名) *Tetraspora*

2 形態

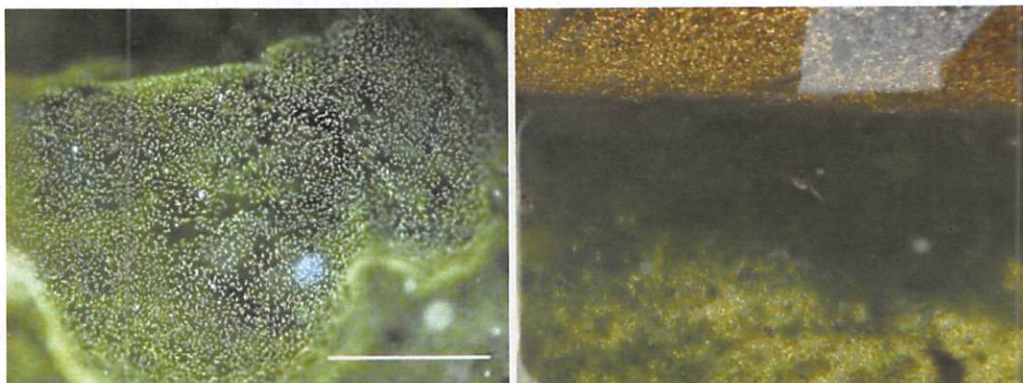
形状：球形の細胞が寒天質基質に包まれている。寒天質基質は壊れやすく、水中から取り出すとちぎれてしまう。細胞は、4個ずつの集塊となり寒天質基質に配列している。2本の偽繊毛があるが、寒天質中に埋れし運動性はない。

大きさ：細胞の直径は5~15 μ m。群体は、厚さ0.5-1.0mm、長さ0.5-2cmで10cmのものもある。

色：薄緑色。寒天質基質は時に褐色になることがある。

葉緑体の様子：葉緑体はカップ状で、ピレノイドは1個。

付着又は浮遊の様子：付着藻類、浮遊藻類



[ヨツメモ]a

[緩速ろ過池での繁殖]

a : http://homepage2.nifty.com/nyanpu-/algae2_ver5_013.jpg

3 生理

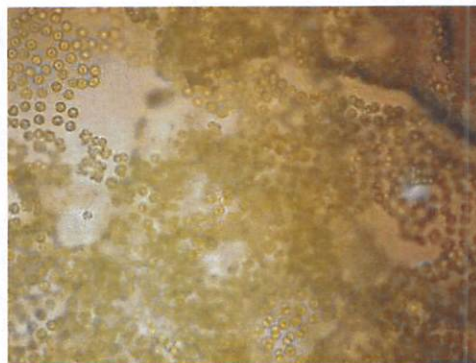
無性生殖：群体はちぎれて増殖する。2 鞭毛をもつ遊走子を形成する。

有性生殖：同型の雌雄配偶子による有性生殖を行う。

4 生態

環境：年間を通して生育し、小川、水田、池、沼などの水域で見られる。浮遊性のものと小石や木片に付着しているものがある。

緩速ろ過池：ろ過膜藻類として繁殖。塩素耐性があるので、前塩素処理を行うと他の藻類との競争に勝ち、繁殖しやすくなることもある。



[遊走子形成]

5 緩速ろ過池での障害

ろ過閉塞：寒天質に覆われているため、ろ過池で繁殖し、ろ過膜に蓄積するるとろ過閉塞の原因となる。

遊走子の放出によるろ過水濁度検出：大きく成長した群体から一斉に遊走子が放出されると、昼間は走光性により浮遊しているが、夜間は水流と共にろ過膜付近に集積する。これは、全体ではろ過膜に大きな負荷となる。この場合、ろ過膜の薄い部分があれば、そこからろ過水に混入し、濁度検出となる。薄い部分がなくても、緩速ろ過の粒子除去率 99~99.9%を考慮すると、ろ過池全体からの漏出もあり得る。

6 障害への対処方法

(1) 緩速ろ過池での対処

藻体の排出（オーバーフロー）：寒天質基質はちぎれやすいので、掬い上げることは難しいが、ちぎれたものは浮遊しやすいので、越流管を活用してオーバーフローにより除去す

る。

ろ過停止：ろ過閉塞が発生した場合は、ろ過停止して削り取りなどの洗浄を行う。

生物ろ過膜正常化：生物ろ過膜の薄い部分が形成されないように、その原因に応じて、小動物の制御、ろ過池流入部での洗掘防止、藻類浮上の影響抑制、壁面短絡流の影響抑制、気泡の発生抑制を行う。

ろ過膜の清掃の徹底：削り取りの際、砂層内に藻類が残存しないように清掃する。逆張りにより充水した水に藻類が残っている場合には排水する。開渠で繁殖する藻類がろ過池への供給源になっている場合は、繁殖時に開渠の壁面の清掃を行う。

(2) 水源貯水池での対処

化学薬剤の使用：耐塩素性があり、0.1mg/L程度の塩素注入では逆に出現するが、1.0mg/Lに増量するか硫酸銅を併用すると消滅する。

緩速ろ過の生態水文学に基づく管理

1. はじめに

緩速ろ過は、砂層表面に自然に形成される生物ろ過膜を活用する浄水処理方法で、簡易な施設と維持管理で良質な水道水を得ることができるという特徴がある。この生物ろ過膜は、藻類、細菌類、小動物及びそれらの代謝生成物から成り、構成要素の食物連鎖など生態学的なメカニズムによる浄化機能がある。また、緩速ろ過池は、ろ過速度や損失水頭などのパラメーターにより運転され、得られるろ過水の水質は濁度などで管理される。このような生物と水の相互関係から生態系サービスを得るシステムは、生態水文学の概念で整理することができる。

2. 生態水文学の概念

生態水文学 (ecohydrology) について、ポーランド科学アカデミー生態水文学ヨーロッパ地域センター長の M. Zalewski 教授は、基本的な仮説と原理を提唱している¹⁾。それらは、水循環を扱う水文学を基本的な枠組みとした上で、水文学的プロセス (hydrological processes) と生物学的なプロセス (biological processes) の相互調節 (mutual regulation) とそれらの協働的な統合 (synergistic integration)、さらに工学的な手段との調和に基づく生態工学的な方法 (ecological engineering methodology) を活用することで、流域内での生態系収容力 (carrying capacity) や回復力 (resilience) の向上を図るものである。詳細は、以下の通りである。

基本的な仮説は次の3つである。

- ①流域内 (catchment scale) で、水文学的因子 (hydrological parameters) を調節することにより、生物学的なプロセスを制御することができる。
- ②流域内の生態系の生物学的構造 (biological structure) は、水文学的なプロセスを調節することができる。
- ③流域内で2つの調節を互いに協働的に統合することにより、生態系サービスを提供する淡水資源 (freshwater resources) の持続的発展 (sustainable development) に活用できる。
この仮説に基づく総括的な目的は、生態系サービスのための生態系収容力と、人為的なストレス (anthropogenic stress) に対する回復力を高めることである。

原理は次のようなものである。

- ①水文学 (枠組み) : 水、経済、社会の持続可能性に対する脅威 (threats) と契機 (opportunities) を明らかにするために、流域内での水と生物相の相互作用に関する知見を統合していく。
以下の面を含む。

規模 : 流域内の中規模水循環 (mesocycle water circulation) の範囲で、ここで生態系プロセスを定量化する。

動態 (dynamics) : 水と温度で、地圏と淡水圏生態系の駆動力 (driving forces) となる。

因子間の階層構造(hierarchy)：非生物的水文学的因子が支配的で、それらが安定的で予測可能な場合は生物的相互作用も明確になる。

②生態学（目標）：ストレスに対して進化的に形成されていく生態系の回復力と抵抗力(resistance)、及び人為的な影響に対する収容力を増加させるための生態遷移(ecological succession)のパターンを理解すること。

③生態工学（方法）：生物多様性(biodiversity)の回復、水質改善、社会のための生態系サービスの向上のための管理ツールとして、生態系の特性を活用する。以下の方法による。

二つの調節：生物相を形成することで水文を、水文を変えることで生物相を、それぞれ調節する。

統合：流域内で、種々の調節が淡水資源を安定化させ質を改善するために協働する方向で統合する。

調和：生態水文学的手段を、必要な水文工学的な解決策(hyrotechnical solutions 例：下水処理場、都市域での堤防)と調和させる。

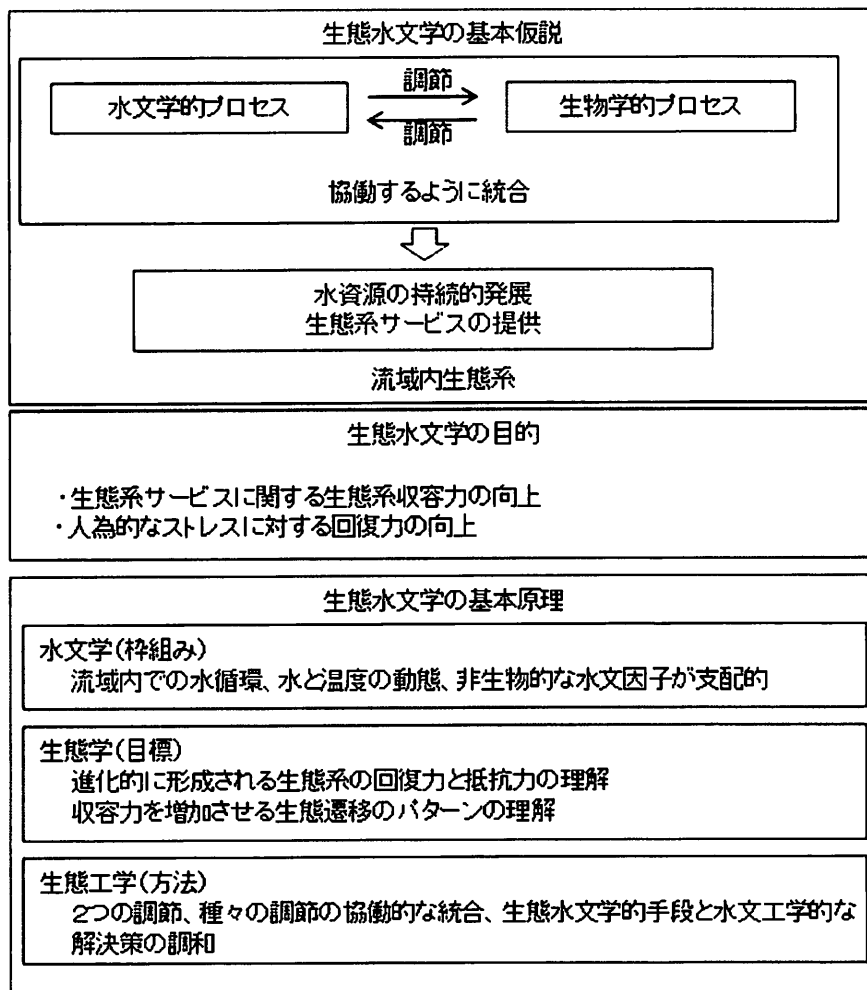


図1 生態水文学の基本仮説、目的、基本原理

3. 緩速ろ過池と生態水文学

(1) 生態水文学からみた緩速ろ過池

緩速ろ過池を、生態系として捉え、生態水文学の基本仮設に基づき以下のように整理される。(図2)

- ① 生物学のプロセス：砂層表面のシュムッツディッケ (Schmutzedecke) と砂層内部まで形成されるズーグレア (Zoogloea) からなる生物ろ過膜がプロセスの中心的な場となる。ろ過池水は、流入水から生物ろ過膜に至る連続的な変化の場となる。一次生産者としての藻類、消費者としての原生動物や小動物、分解者としての細菌類が構成要素となり、それらの食物連鎖の過程で水が浄化される。ろ過の継続に伴う生物ろ過膜の遷移、ろ過池流入水及びろ過池水の変化に対する生物ろ過膜の収容力、削り取り後及び成熟後の生物ろ過膜の回復力の機能がある。
- ② 水文学のプロセス：生物学のプロセスを調節する水文学的因子には、光、水、温度及び操作がある。光は、生物ろ過膜の藻類の繁殖を左右し、覆蓋やろ過池水の深さで調節される。ろ過速度はろ過池水や生物ろ過膜のプロセスに影響し、損失水頭は緩速ろ過の継続に直接的に影響し藻類の繁殖や小動物の生息に影響される。温度は調節し難い因子であるが、季節変動含めて生物ろ過膜の生物学のプロセスに大きく影響する。生物ろ過膜の削り取りは、生態系としての緩速ろ過をある程度ではあるがリセットさせる。
- ③ 生態系サービスの提供：2つのプロセスの相互調節を協働するように統合することで、良質な水道水を量的にも確保することができる。特に、水文学的因子を調節することで、生物学のプロセスを制御することが重要となる。

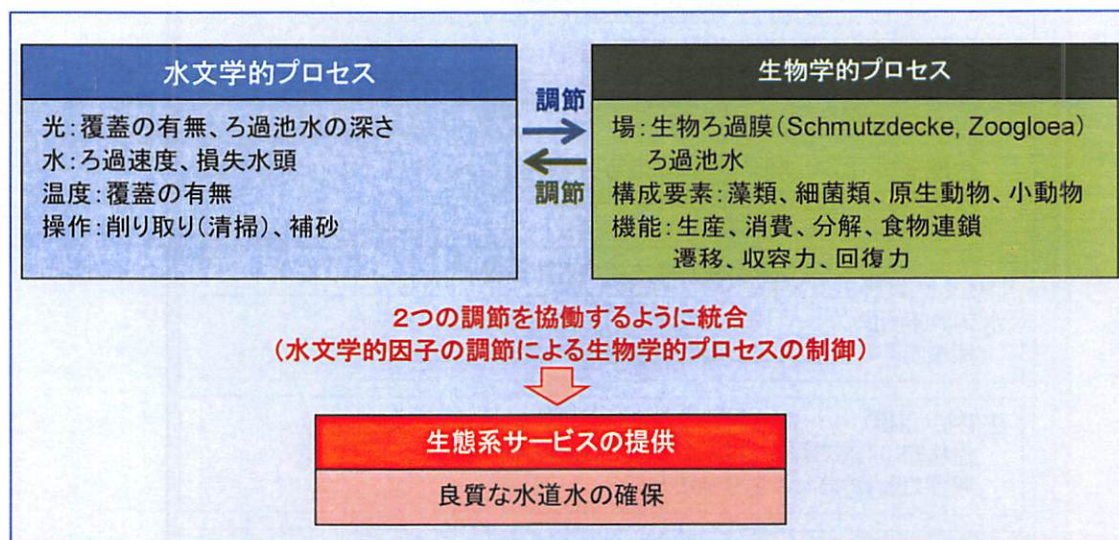
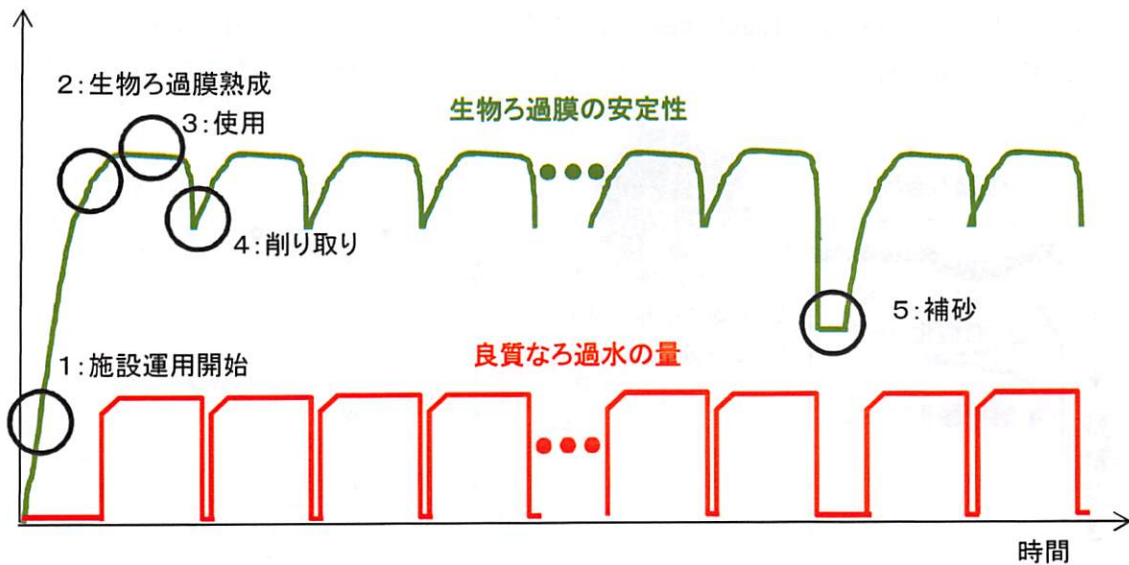


図2 生態系としての緩速ろ過池

(2) 生態水文学に基づく運転操作

緩速ろ過池では、当初の施設運用開始に引き続き、ろ過放水しつつ生物ろ過膜の熟成、

ろ過池の使用、ろ過停止して生物ろ過膜の削り取りが行われる。次のサイクルでは、削り取り後の充水、生物ろ過膜の熟成、ろ過池の使用が再び行われる。このサイクルが繰り返されたのち、砂ろ過層が一定以下の厚さになると補砂が行われる。これらの操作において、生物ろ過膜の生物学的プロセスの安定性を考慮した水文学的因子の調節を行うことにより、良質なろ過水の確保につなげることができる（図3）。なお、これらの調節の効果の定量化は難しく、緩速ろ過池の置かれた種々の条件（原水水質、水温、生物ろ過膜の状態等）の影響を受けるので、それぞれの緩速ろ過池に応じた制御が必要となる。



運転操作		相互調節とろ過水への影響(水文、生物、サービス)
1	施設運用開始	新砂は有機物が付着し難く運用開始に必要な期間が長い。
2	生物ろ過膜熟成	ろ過放水しつつ低ろ過速度で通水。生物相(藻類、細菌類)及びその代謝生成物を砂層表面付近に安定的に保持。砂の有効径が小さいほど熟成期間が短縮。水温が高いほど熟成期間が短縮。
3	使用	生物ろ過膜への蓄積による損失水頭の上昇。砂の有効径が小さいほど損失水頭の上昇が大きい。ろ過速度の急変を避け、生物ろ過膜内の層的分布を保持。ろ過速度を下げ過ぎないことによる生物ろ過膜の好気性維持による水質の確保。生物ろ過膜の収容力によるろ過池水の変化への対応。生物ろ過膜の損傷に対する回復力による水質の維持。
4	削り取り	削り取りによる砂層表面の除去、損失水頭の回復。削り取り厚さが生物ろ過膜の回復力へ影響。砂層内水位維持による生物ろ過膜熟成期間の短縮化。砂層の乾燥防止による生物ろ過膜熟成期間の短縮化。
5	補砂	切り直しによる生物ろ過膜熟成期間の短縮化。

図3 生態水文学に基づく緩速ろ過池の運転操作と良質な水道水の確保

(3)生物ろ過膜の生態水文学的機能

生物ろ過膜の生態水文学的機能として、生物ろ過膜内の浄化機能の層的分布、収容力によるろ過池水の変化への対応、生物ろ過膜の損傷に対する回復力、生態遷移による回復力

があり、それらを有効に機能させるための水文学的因子の調節が必要となる。

①生物ろ過膜内の浄化機能の層的分布の保持

生物ろ過膜では、有機物が分解、無機化されるゾーンと生成した無機物が酸化されるゾーンに分かれ、それぞれに関与する細菌類が繁殖している。ゾーンの厚さは、砂層の粒径、ろ過速度及び原水水質に影響される。図4に示したアンモニアと亜硝酸の酸化の例では、生物ろ過膜への有機物負荷やアンモニア負荷が少なく、ゾーンの厚さは小さいため、アンモニアと亜硝酸の低下は0~10cmの層で起きている。ろ過速度の変化があると、関与する細菌類（Nitrosomonas 及び Nitrobacter）分布と水中の基質物質濃度にずれが生じ、それらが未反応のままろ過水に混入するおそれもあるので、特にろ過速度の急激な増加は避ける必要がある。

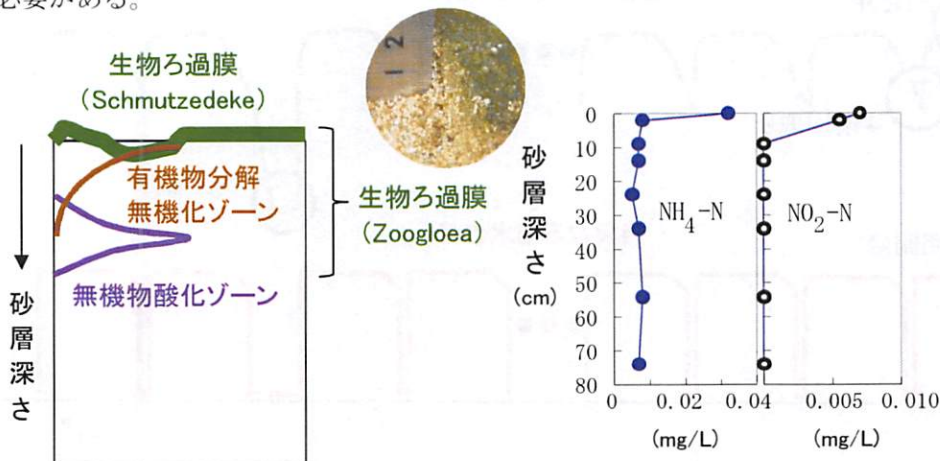


図4 生物ろ過膜内の層的分布の保持とアンモニアと亜硝酸の酸化

②生物ろ過膜の収容力によるろ過池水の変化への対応

収容力とは、流入水やろ過池水に水質変化があった場合でも、生物ろ過膜が健全な状態を維持し良質な水道水が確保できる機能である。流入水やろ過池水の変化が生物ろ過膜の収容力を超えていなければ、ろ過池水質に影響がない場合もあり得る。

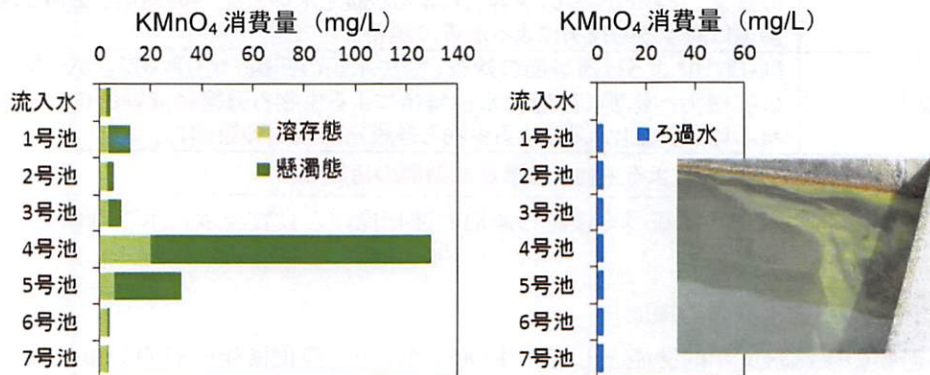


図5 植物プランクトン繁殖部分のろ過池水とろ過水の水質

特に懸濁物質による変化の場合は、生物ろ過膜への抑留による平準化と反応時間の延長により影響が抑えられる。図5は、表面集積型の植物プランクトンがろ過池水で部分的に繁殖し水質が大きく変化した際にも、ろ過水水質に影響がほとんどなかった例である。

③生物ろ過膜の損傷に対する回復力 (図6)

メロシラ・バリانسなどの糸状藻類が生物ろ過膜で繁殖する場合、光合成により生成した微細気泡が藻体に付着し、浮力として作用すると砂層表面まで浮上することがある。その際、付着部のある藻類では砂層の一部とともに浮上し、生物ろ過膜の一部が損傷する。この時、砂層内のズーグレアが発達している場合は、濁質がそこで捕捉されるのでろ過水水質に影響はないが、ズーグレアが薄い場合は砂と共に浮上してしまうので、ろ過水濁度が検出されてしまうことがある。特にろ過面積の小さい池で影響が大きく、昼間にろ過膜を追加する時間帯のろ過水に濁度が検出され、ろ過水濁度の日周変動がみられることがある。その後、損傷部分が周囲から補修されるとともに藻類が再増殖し、生物ろ過膜は通常の状態に戻る。これが、回復力の機能である。砂層内のズーグレアは、削り取りの際、砂層の乾燥を可能な限り防ぐことで、維持され易い。

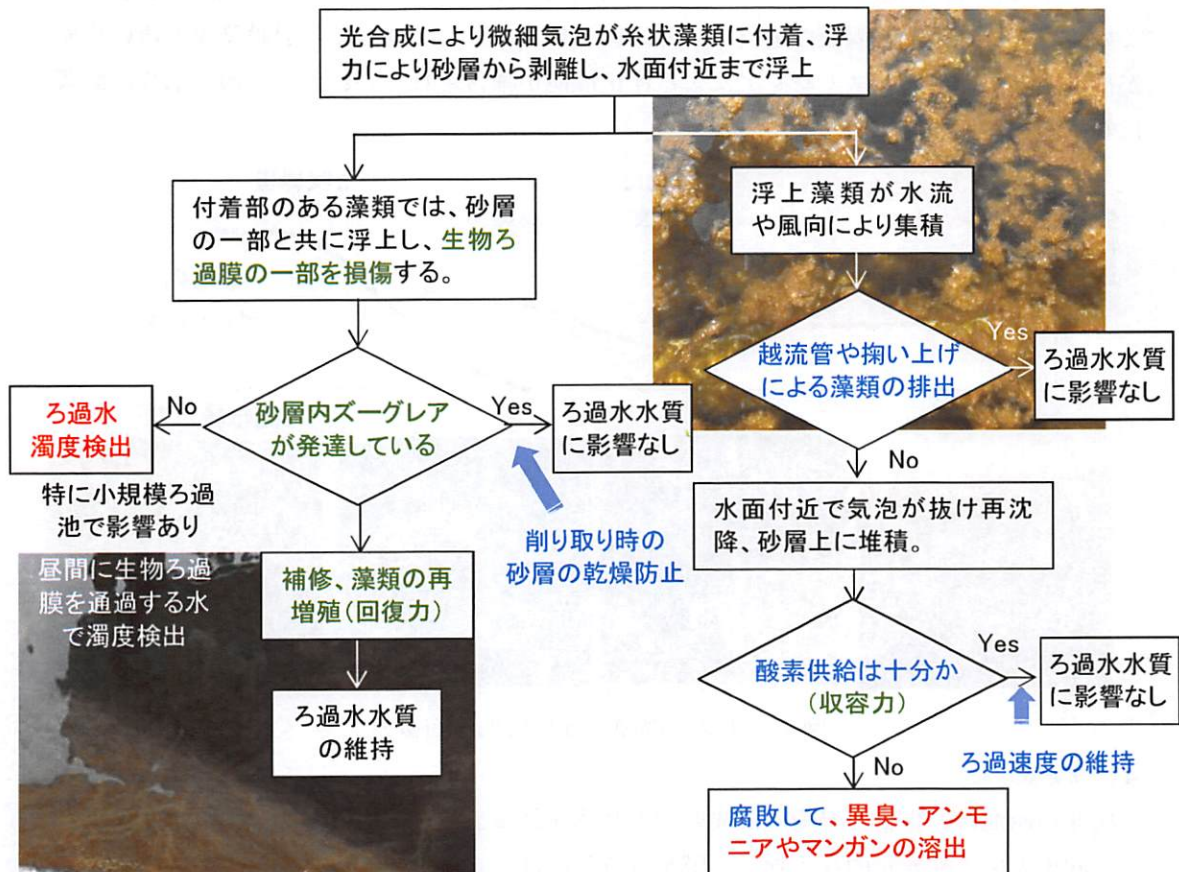


図6 糸状藻類の浮上による影響

一方、浮上した藻類は、水流や風向によりろ過池内で集積し易い。この時、越流管からのオーバーフローや、網やレーキで掬い上げる作業で排出させると、これによる問題は発生しない。浮上した藻類は、水面付近で気泡が抜けると浮力を失い、再沈降して砂層上に堆積する。堆積した藻類内部に酸素が供給されないと、腐敗して、異臭やアンモニア、マンガンの溶出に繋がる。ろ過速度が維持されて、酸素供給が十分な場合には、ろ過水水質には影響がない。これは、生物ろ過膜の収容力のひとつといえる。

④生態遷移による回復力

緩速ろ過池では、生物ろ過膜が成熟した後も種々の遷移が起こる。例えば、ろ過膜藻類で糸状珪藻のメロシラ・バリアンスが優占した後、ユスリカによる摂食が起こり、その後緑藻類へと遷移していくケースがある²⁾。これを図7に模式的に示す。当初糸状珪藻が生物ろ過膜で繁殖するが、水温が高い時期にはユスリカの幼虫が珪藻を摂食し、生物ろ過膜が薄くなる。この珪藻の減少はユスリカの密度に影響されるが、それはユスリカを捕食する魚類にも影響される。珪藻が減少するとともに、ユスリカに摂食されない緑藻が増加していく。また、緑藻が増殖する過程で、より効果的に光を利用しやすい糸状緑藻へと遷移していく。これが生物ろ過膜の遷移による回復力である。この過程でろ過膜藻類の薄い状態が出現するが、砂層のズーグレアによる浄化機能が維持されていれば、ろ過水水質に影響はない。

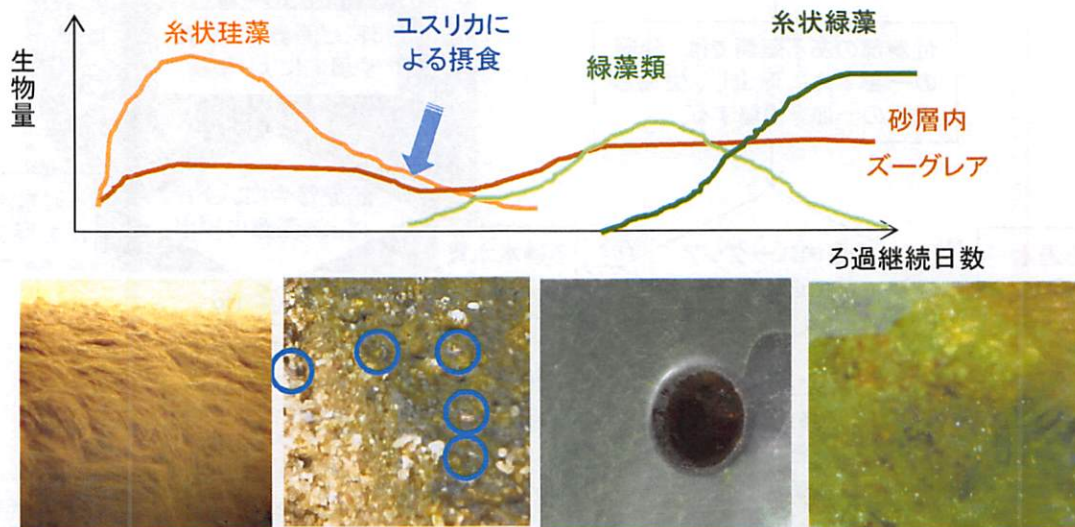


図7 生物ろ過膜の遷移による回復力

4. まとめ

緩速ろ過池は、生物ろ過膜の構成要素の食物連鎖による浄化機能があり、さらに、収容力と回復力により安定的な生物ろ過膜を維持し続けることができる。また、生態水文学に基づく管理の視点から、ろ過速度など水文学的因子を調節することにより、良質なろ過水の確保につなげることができる。ただし、これらの調節の効果の定量化は難しく、原水水

質、水温、生物ろ過膜の状態等種々の条件の影響を受けるが、それぞれの緩速ろ過池の状況に応じて調節することにより、安定的な生物ろ過膜を維持するよう制御できる可能性がある。

参考文献

1) Zalewski, M. : Ecohydrology concept.

<http://www.ecohydro.pl/index.php?p=ecohydrology%20concept>

2) 中本信忠: 自然浄化機能を活用した生物ろ過（緩速ろ過）によるおいしい水のつくり方、途上国で求められている技術はなにか？

<http://cwsc.or.jp/contents/document/pdf/matsueNPO-1.pdf>



(一社) 名古屋環未来研究所

E-mail ize00424@nifyu.com

URL http://wa-links.net/home/?page_id=36

(2016年10月)

