

鉄バクテリアを用いた地下水の浄水処理

Ground Water Treatment System Using Iron Bacteria



(環)環境本部技術部第6グループ
中 町 眞 美
Mami Nakamachi
(環)環境本部技術部第2グループ
藤 井 督 大
Tokuhiro Fujii
(環)環境本部第2営業部第3営業課
石 丸 豊
Yutaka Ishimaru

大阪府交野市，奈良県斑鳩町での地下水を対象とした浄水処理実証実験結果について報告する。
地下水中の溶存鉄や溶存マンガンさらにアンモニア性窒素を鉄バクテリアや硝化菌といった生物を利用した自然ろ過方式にて良好に除去出来ることを実証した。さらに，この自然ろ過法の後段に他の処理方式を付加することで，交野市での高濃度鉄，斑鳩町での有機物に対応可能となり，水道法における水質基準を満足する水質を安定して得ることが出来た。

この方式では，薬品使用量を極限まで低下させることが出来るため，「より自然でおいしい水」を得ることが出来るとともに，維持管理性が容易であることや薬品費や発生汚泥が少ないことなど運転上のメリットが大きいことが特長である。

Soluble iron and manganese in ground water, and ammonia nitrogen were favorably removed with natural filtration utilizing iron bacteria and nitrifying bacteria in demonstration tests. By adding a process to the rear of the natural filtration, fresh water satisfying the Waterworks Law can be obtained; for example, rapid sand filtration to remove high strength iron contents in Katano City, Osaka, and a biological activated carbon process to remove organic matters in the case of Ikaruga Cho, Nara. The combined system features easy maintenance, minimizing chemical costs and sludge generation.

Key Words :

浄	水	Drinking water
地	下	Ground water
生	物	Biological filtration
自	然	Natural filtration
鉄	バクテリア	Iron bacteria
硝	化	Nitrifying bacteria
鉄		Iron
マ	ン	Manganese
ア	ン	Ammonia nitrogen
ト	リ	Trihalomethane formation potential
ハ	ロ	
メ	タ	
ン	生	
成	能	

まえがき

地下水は生活排水の影響を受けることが少なく、また、雨水などが地下に浸透する際に土壌の微生物の浄化作用を受けるので清浄な水質であることが多い。加えて、年間の水質の変動が少なく、水温も夏季・冬季に渡り一定値を示す傾向が強い。このような利点から、地下水は水道水源としてよく利用されている。

しかし、地域によっては地殻を構成する岩石層から溶出した鉄やマンガンなどが含まれる場合がある。一般的にこれらの物質の除去は、溶存鉄や溶存マンガンに対し、酸化剤として次亜塩素酸ナトリウムを注入したり、曝気により空気酸化して不溶性物質とした後、凝集剤などで凝集沈澱・ろ過する方法が広く採用されてきた。この方法は、溶存物質を除去するために大量の薬品を使用しなければならず、本来のおいしい地下水の味を損ない、薬品使用量が多いために発生する汚泥量も多くなるという短所もある。

一方、鉄が多い地下水には鉄バクテリアが含まれることが多いことは古くから知られていた。

近年、この鉄バクテリアを利用し無薬注で除鉄・除マンガン処理することにより、建設費、運転費の削減を達成した実績も増えてきた。

当社においては、1993年に上水道としては、わが国で初めて建設された京都府城陽市における鉄バクテリア利用ろ過施設（以下、自然ろ過施設）を始めとして、奈良県三宅町、広島県海田町に納入実績を有す。

本稿では、この自然ろ過施設での処理状況や運転状況、さらに他の施設を付加した浄水処理について、大阪府交野市、奈良県斑鳩町でおこなった実証実験

結果を報告する。

1. 交野市での実証実験について

現在、交野市の私市浄水場では、原水である地下水を次亜塩素酸ナトリウムで酸化し、凝集剤のPACにより凝集沈澱処理後、マンガン砂ろ過でろ過して浄水としている。一方、「より安全でおいしい水」を求める市民の水道水質への高い関心・要望に応えるべく、将来の浄水方法の変更計画を視野に入れ、現在の凝集沈澱・急速ろ過方式に加え、生物を利用した処理方式の検討をおこなっている。

その一環として、現在の地下水をもちいて、処理性能の確認、運転が長期安定して可能であることおよび本方式を導入する場合の設計・維持管理に必要な諸元を得ることを目的として1999年7月から私市浄水場にて鉄バクテリアによる実証実験を開始した。

1.1 交野市の原水性状

原水である地下水水質を第1表に示した。鉄が5 mg/L程度と高濃度に含有されている。マンガンおよびアンモニア性窒素も高く、加えて溶性ケイ酸が高いため曝気により凝集沈澱ろ過が困難なコロイダル鉄を生成することが判る。また、この地下水を生物処理するにあたり、鉄バクテリアによる鉄・マンガンの酸化だけでなく、硝化菌によるアンモニア性窒素の硝化が必要である。一方、過マンガン酸カリウム消費量は低く、有機物については汚染の少ない良質な地下水である。

鉄バクテリアや硝化菌は好気性菌であるので、溶存酸素（以下、DO）を必要とする。そこで、DO供給のための曝気により生成するコロイダル鉄の、自然ろ過処理での除去状態を確認する必要がある。

1.2 実験方式と実験装置仕様

原水には鉄が高濃度に含まれるので、自然ろ過処

第1表 原水分析結果（交野市）
Table 1 Result of raw water quality (Katano city)

Item	Raw water quality	Item	Raw water quality
Temperature (°C)	19.7 (17.3~ 22.0)	Total iron (mg/L)	5.19 (2.37 ~23.8)
pH (—)	6.5 (6.5~ 6.6)	Total manganese (mg/L)	0.372 (0.300~ 0.410)
Turbidity (unit)	16.2 (2.4~ 72.0)	Potassium permanganate consumption (mg/L)	2.1 (<1.0 ~ 3.1)
SS (mg/L)	10 (5 ~ 25)	Soluble Silicic acid (mg/L)	55.3 (53.7 ~56.3)
Color (unit)	57 (12 ~140)	Alkalinity (CaCO ₃ , mg/L)	76.1 (74.5 ~78.4)
Ammonia nitrogen (mg/L)	0.66 (0.48~ 0.83)	Aluminium (mg/L)	<0.01
Nitrite nitrogen (mg/L)	<0.005	Dissolved oxygen (mg/L)	<1.0
Nitrate nitrogen (mg/L)	<0.02	ATU-BOD (mg/L)	<2.0

理だけでは十分な鉄の除去は難しいと思われる。そこで、自然ろ過槽と急速ろ過槽の二段ろ過方式で実験をおこなった。

実験フローを第1図に装置諸元を第2表に示した。

地下水を原水調整槽に受入れ、ここで生物処理に必要なDOを供給する。鉄バクテリアや硝化菌が生息し、十分な処理能力を発揮するためにはこのDOの調整が重要である。

原水調整槽から自然ろ過槽に導かれた水は、アンササイト層と珪砂層で生物酸化処理を受けるとともに物理的にろ過される。この自然ろ過水に、少量のPACと次亜塩素酸ナトリウムを注入し、マンガ

ン砂を用いた急速ろ過槽でろ過し浄水を得る。なお、自然ろ過槽は2系列設置し、ろ過速度などの比較検討をおこなった。

洗浄方式は、補助洗浄には表面洗浄をおこなうが、通常水中で行われる表面洗浄ではなく、この表面洗浄工程に入る前に水抜き工程を設け、いったんろ過槽内の水位を下げ、ろ層表面を暴露させて行うダイレクト表洗方式である。

1.3 自然ろ過処理の実験結果

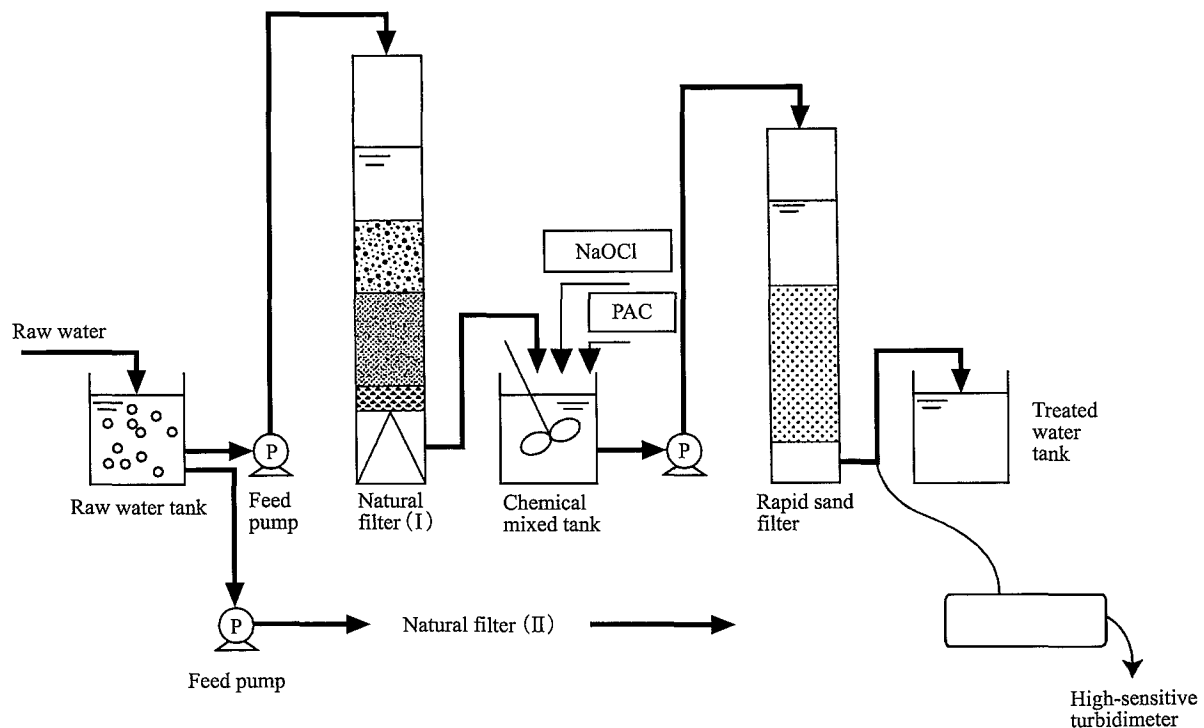
1.3.1 ろ過速度とろ過抵抗

ろ過速度は、65 m/dと130 m/dを基本に実験をおこなった。

第2表 実験装置の諸元 (交野市)

Table 2 Specification of pilot filter (Katano city)

	Natural filter		Rapid sand filter	
Filtration rate	130 m/d, 65 m/d		240 m/d	
Size of filter	200 mmφ × 3 500 mmφ (PVC)		100 mmφ × 3 000 mmH (PVC)	
Media	Anthracite	1.5 mm 300 mmH	manganese media	0.6 mm 600 mmH
	Sand	0.6 mm 400 mmH		
	Gravel	2 ~ 4 mm 50 mmH		
		4 ~ 7 mm 50 mmH		
	7 ~ 14 mm 100 mmH			
Underdrain	Leopold underdrain 300 mmH	Disc type strainer 200 mmH		



第1図 実験フロー (交野市)

Fig. 1 Schematic diagram of pilot plant (Katano city)

ろ過継続によりろ過水頭は上昇するが、有効ろ過水頭が1700 mmにおいて、ろ過速度が65 m/日では2～3日間、ろ過速度が130 m/日では1～1.5日間のろ過継続が可能であり、速度が2倍になるとろ過継続時間は1/2倍となった。ろ過抵抗の主な因子は、溶存鉄の流入による鉄バクテリアの増殖と空気酸化された水酸化鉄であると推測される。

このように、ろ過表層への鉄の析出が多く、ろ過抵抗が上昇しやすいため、安定した運転を継続するためには、適切な洗浄を行い増殖した鉄バクテリアと水酸化鉄を系外に完全に排出することが重要である。

1. 3. 2 鉄バクテリア

本地下水に存在する鉄バクテリアを調査した結果、優占種は *Leptothrix sp.* (レプトスリックス属) であり、*Gallionella ferruginea* (ガリオネラ フェルギネア) もわずかながら検出された。レプトスリックス属は鉄とマンガンを酸化できる種類であるので、両項目の除去が可能であると推測される。

1. 3. 3 自然ろ過処理性能

自然ろ過処理水質は、ろ過速度が65 m/日と130 m/日での差異は認められず、いずれの速度においてもマンガンは0.001 mg/L 以下、アンモニア性窒素は0.01 mg/L 以下であり、完全に除去されている。鉄は、91 %除去されているものの0.4 mg/L 程度残留し、水道法による水質基準値を満足しなかった。

鉄については、原水および処理水の存在状態を調査した。測定には、砂ろ過を想定した孔径7 μm のろ紙と0.45 μm フィルターを使用し、0.45 μm ろ過水を溶存性、7 μm ろ過水と0.45 μm ろ過水の差をコロイダル状態、全鉄と7 μm ろ過水の差を懸濁状態と仮

定した。結果を第2図に示したように、原水は約70 %が溶存性の状態でありコロイダルは数%しか存在していない。DO調整により溶存性が30 %程度に減少しコロイダルは15 %程度に増加、懸濁状態が55 %で主体になった。生物処理後の自然ろ過水は、いずれの状態の鉄も減少しているがその割合は溶存性が35 %、コロイダルが60 %、懸濁状態が5 %とコロイダル鉄が主体になっている。

次に各物質の自然ろ過槽内における除去状態の調査をおこなった。原水、自然ろ過槽に流入後のろ材と接触する前のアンスラサイト上部、アンスラサイト層内の上部、アンスラサイト層と珪砂層の間、珪砂層の下部および処理水を採取した。

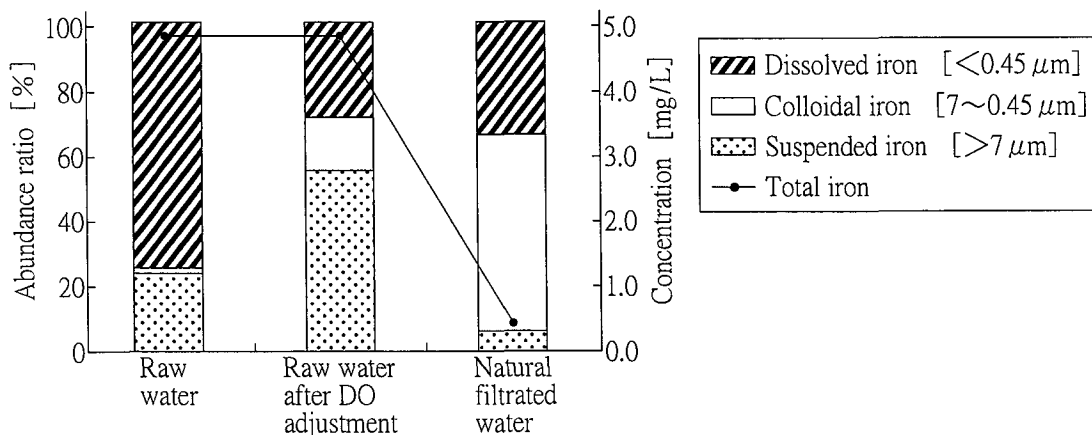
結果を第3図に示したように、鉄はアンスラサイトの表層部で除去され、その後はほとんど処理されていない。マンガンはアンスラサイト層と珪砂層の全層で段階的に低下している。アンモニア性窒素も全層で処理されているが、アンスラサイト層での低下が比較的大きい傾向を示した。鉄が表層部でしか除去されないことから、鉄を処理する生物は表層部に生息し、マンガンやアンモニア性窒素を処理する生物は全層に生息しているものと推測される。

1. 4 急速ろ過処理の実験結果

1. 4. 1 ろ過速度とろ過抵抗

残留する少量の鉄を除去するため、酸化剤として次亜塩素酸ナトリウム、凝集剤としてPACを注入したのち急速ろ過をおこなった。次亜塩素酸ナトリウムは、ろ過水の残留塩素が0.5 mg/Lであることを目安とした場合は0.6 mg/L 程度の注入となり、PACは5 mg/L 程度注入した。

ろ過速度は、240 m/日で、有効ろ過水頭が



第2図 鉄の存在する形態

Fig. 2 type of Iron of each step

1 600 mm においては、1 ~ 1.5 日間のろ過継続が可能であった。

1. 4. 2 急速ろ過処理性能

自然ろ過水ではコロイダル鉄が主体であったが、最終処理水である急速ろ過処理水の鉄濃度は、0.006 mg/l まで低下し99.9 % の良好な除去率を得た。

1. 5 結果まとめ

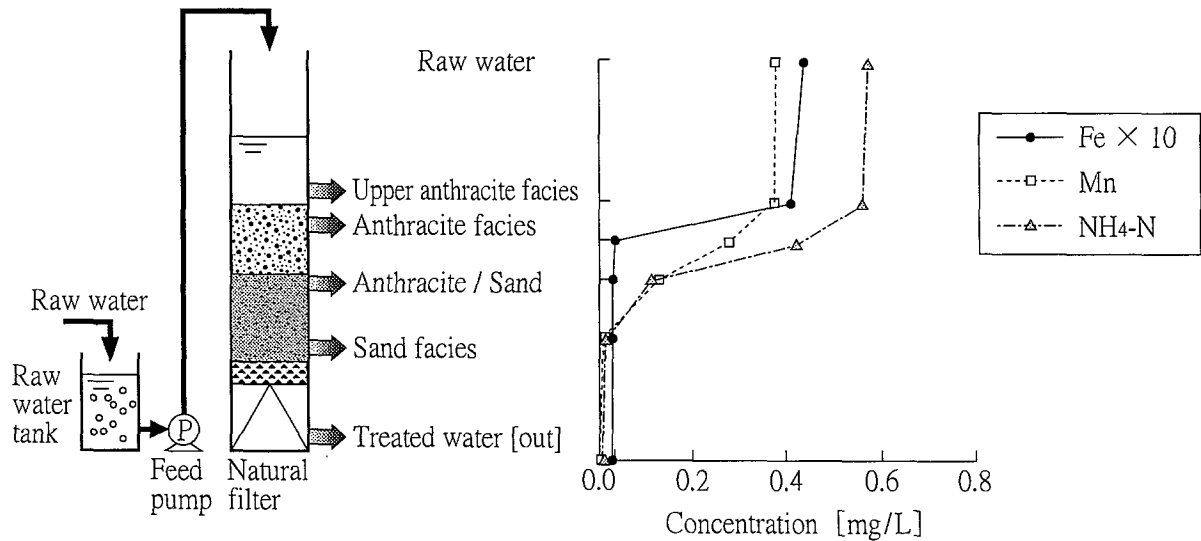
地下水中の鉄、マンガンおよびアンモニア性窒素の除去を目的として、「自然ろ過」+「急速ろ過」の二段処理方式での実験をおこなってきた。

結果を第4図に示したように、自然ろ過での処理性能の確認を行うことを主体として、種々の知見を得、マンガンとアンモニア性窒素は完全に除去出来ることが判った。原水中の高濃度の鉄に対しては、

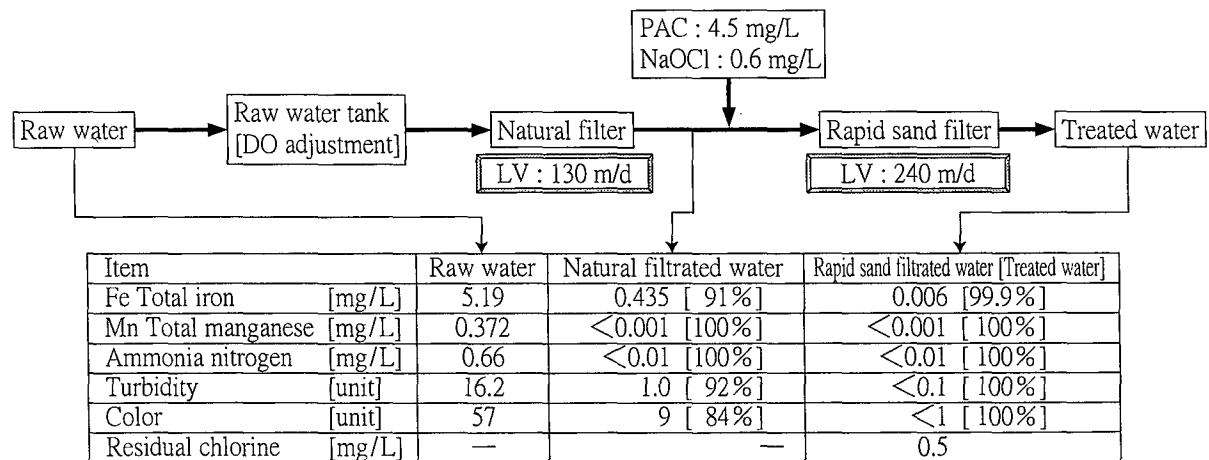
自然ろ過では90 % 以上の除去率を有するものの水質基準値を満足することは出来なかった。

自然ろ過が万が一ダメージを受けた場合の安全性も考慮し、自然ろ過水に少量の次亜塩素酸ナトリウムとPACを注入しマンガン砂を使用した急速ろ過をおこなうことで鉄はさらに除去され、安定して水質基準を十分に満足する水質を得ることが出来た。

このような、鉄バクテリアや硝化菌といった生物を利用することで、凝集剤は5 mg/L 程度の注入量になり、次亜塩素酸ナトリウムは鉄やマンガンの酸化剤としてはほとんど不要で、消毒用として僅かの注入量となった。薬品使用量を大幅に削減出来ると共に、地下水本来の特長である、「より自然でおいしい水」を得ることが出来た。



第3図 自然ろ過槽内での除去状態
Fig. 3 Minimizing chemicals in natural filter



第4図 実験結果 (交野市)
Fig. 4 Result of pilot plant (Katano city)

2. 斑鳩町での実証実験について

現在、斑鳩町の第1浄水場では、原水である地下水を曝気し、硫化水素の飛散と一部の溶存鉄を空気酸化した後、次亜塩素酸ナトリウムで酸化し、PACにより凝集沈澱処理後、マンガン砂ろ過でろ過して浄水としている。

この原水に適応する、より安全で安定した無薬注の浄水処理方式を検討することを目的として、回収率、消毒剤の注入量および消耗品の交換頻度等の知見を得るために、2000年2月から2001年4月までの約14ヶ月間、第1浄水場にて鉄バクテリアによる実証実験をおこなった。

2.1 斑鳩町の原水性状

原水である地下水の水質を第3表に示した。鉄、マンガンおよびアンモニア性窒素、さらに過マンガン酸カリウム消費量やE₂₆₀といった有機物質が高く、トリハロメタン生成能が高い値を示している。トリハロメタン生成能の各成分比はクロロホルム生成能が19%、ブロモジクロロメタン生成能が29%、ジ

ブromoクロロメタン生成能が37%、ブromoホルム生成能が15%で、ブロム系トリハロメタンの生成能が高い割合である。

その他の特徴としては、硫化水素が検出されている。溶性ケイ酸は、その濃度から曝気によるコロイダル鉄の生成はないと思われる。

2.2 実験方式と実験装置仕様

原水の性状から、原水調整槽で曝気によるDO供給と硫化水素の除去をおこなった後、自然ろ過槽で鉄バクテリアによる鉄とマンガンの酸化および硝化菌によるアンモニア性窒素の硝化によりこれらの物質を除去し、後段の生物活性炭ろ過槽で有機物質の低減をおこなう実験方式とした。

装置諸元を第4表に示した。なお、自然ろ過槽は2系列設置し、ろ過速度の影響などの比較検討をおこなった。

2.3 自然ろ過処理の実験結果

2.3.1 ろ過速度とろ過抵抗

ろ過速度は、70 m/日と130 m/日を基本に実験を

第3表 原水分析結果(斑鳩町)

Table 3 Result of raw water quality (Ikaruga cho)

Item	Raw water quality	Item	Raw water quality
Temperature (°C)	20.2 (15.0 ~ 26.3)	Total iron (mg/L)	1.08 (0.68 ~ 2.1)
pH (-)	7.5 (6.9 ~ 7.8)	Total manganese (mg/L)	0.345 (0.240 ~ 0.559)
Turbidity (unit)	3.3 (2.5 ~ 4.5)	Potassium permanganate consumption (mg/L)	4.7 (3.0 ~ 5.7)
Color (unit)	22 (16 ~ 26)	Soluble silicic acid (mg/L)	36.1 (35.3 ~ 36.8)
Ammonia nitrogen (mg/L)	1.23 (0.97 ~ 1.90)	Alkalinity (CaCO ₃ , mg/L)	131 (125 ~ 134)
Nitrite nitrogen (mg/L)	<0.005	Aluminium (mg/L)	<0.01
Nitrate nitrogen (mg/L)	<0.02	Hydrogen sulfide (mg/L)	0.040 (0.028 ~ 0.052)
THM-FP (mg/L)	0.080 (0.060 ~ 0.098)	Dissolved oxygen (mg/L)	<1.0
E ₂₆₀ (-)	0.049 (0.041 ~ 0.055)	ATU-BOD (mg/L)	<2.0

第4表 実験装置の諸元(斑鳩町)

Table 4 Specification of pilot filter (Ikaruga cho)

	Natural filter	Biological activated carbon filter
Filtration rate	70 m/d, 130 m/d	133 ~ 255 m/d
Size of filter	200 mmφ × 3 500 mmH (PVC)	100 mmφ × 5 000 mmH (PVC)
Media	Anthracite 1.5 mm 300 mmH Sand 0.6 mm 400 mmH Gravel 2 ~ 4 mm 50 mmH 4 ~ 7 mm 50 mmH 7 ~ 14 mm 100 mmH	Granular Activated Carbon 0.6 mm 1 500 mmH Mean diameter : 1.06 mm Effective size : 0.67 mm Uniformity coefficient : 1.76
Underdrain	Leopold underdrain 300 mmH	Disc type strainer 200 mmH

おこなった。なお、生物を利用した処理法であるので、馴養のため低いろ過速度から実験を開始し徐々に上昇させた。

70 m/日のろ過速度で1回/3日の頻度で洗浄を実施した時の、洗浄後から、ろ過継続に伴い上昇するろ過水頭は平均400 mmAq程度で、最大700 mmAqであった。130 m/日で1回/2日の頻度で洗浄を実施した時は、最大700 mmAq程度の上昇であった。

2.3.2 鉄バクテリア

本地下水に存在する鉄バクテリアを調査した結果、*Leptothrix sp.* (レプトスリックス属) と *Siderococcus sp.* (シデロコックス属) が検出された。

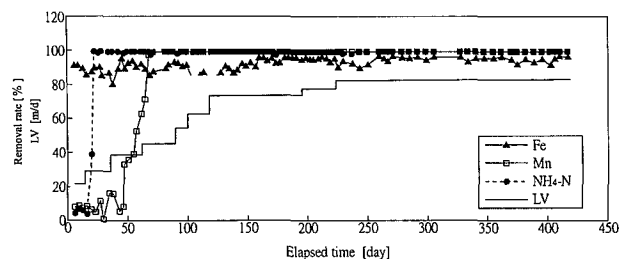
2.3.3 自然ろ過処理性能

ろ過速度が70 m/日における、実験開始からの鉄、マンガンおよびアンモニア性窒素の自然ろ過による除去状態を第5図に示した。

鉄は実験開始初期から良好に除去され、続いてアンモニア性窒素、マンガンの順に除去能力を発揮した。鉄は90%程度の除去率を、マンガンとアンモニア性窒素は馴養後はほぼ完全な除去状態を実験期間中継続した。

130 m/日での除去状態も同等であり、このろ過速度の範囲では処理性能への影響は認められなかった。

硫化水素は曝気により70%程度除去され、さらに自然ろ過処理水では0.005 mg/L以下に除去された。鉄は自然ろ過水では水質基準値の0.3 mg/L以下であるが0.07 mg/L程度残留するため、鉄に起因する色度と濁度が水質基準値を超える場合があった。また、過マンガン酸カリウム消費量やトリハロメタン生成能、有機性色度などの有機物質については自然ろ過処理では低減することが出来なかった。



第5図 自然ろ過処理状態
Fig. 5 The removal of chemicals and LV

2.4 生物活性炭ろ過処理の実験結果

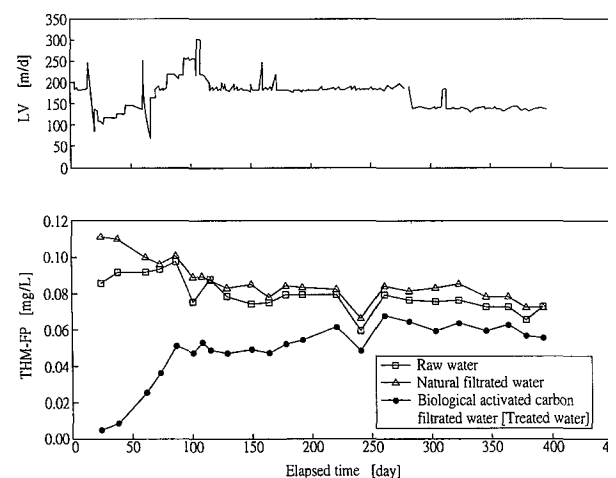
2.4.1 ろ過速度とろ過抵抗

ろ過速度は、実験装置フロー上、前段の自然ろ過のろ過速度で制限される。当初、自然ろ過の2系別の処理水を混合し生物活性炭ろ過原水としていたが実験開始後20日目頃に70 m/日のろ過速度を基本とする自然ろ過槽の処理水だけを原水とした。自然ろ過の馴養に伴い、生物活性炭ろ過速度を上昇させ、133~255 m/日を基本に実験をおこなった。1回/3日の洗浄頻度において、洗浄後からろ過継続に伴うろ過水頭の上昇はほとんど認められなかった。これは、前段の自然ろ過槽で鉄やマンガンが除去され、生物活性炭ろ過槽への流入物質が溶存性の有機物質が主体になったためと思われる。

2.4.2 生物活性炭ろ過処理性能

本実験フローでは薬品を極力使用せず、消毒用として次亜塩素酸ナトリウムだけを注入する。酸化剤としての次亜塩素酸ナトリウムは使用しないので、ろ過槽の流入水に遊離塩素が含まれず、活性炭はろ過水に伴い表面に生物膜を形成し生物活性炭となる。それにより、①活性炭による吸着効果 ②活性炭層内に繁殖する微生物による生物処理効果 ③活性炭の生物再生効果が期待される。

トリハロメタン生成能の除去状態とろ過速度を第6図に示した。トリハロメタン生成能は自然ろ過処理水が原水より高い値になっている。これは、生物処理によりトリハロメタン前駆物質である有機物質が低分子化されトリハロメタンの生成が促進されたためと推測される。



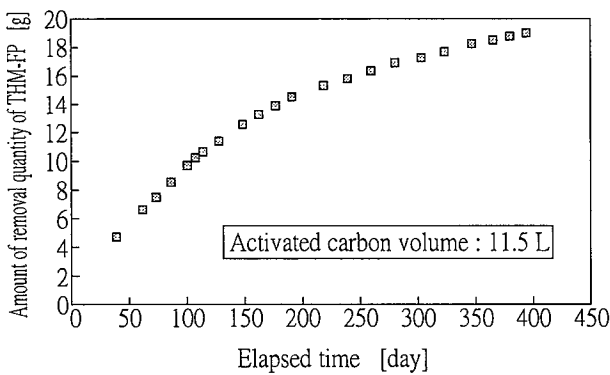
第6図 トリハロメタン生成能の除去状態とろ過速度
Fig. 6 The removal of THM-FP and LV of the biological activated carbon filter.

生物活性炭ろ過処理水は、実験開始時は低い値であるが、徐々に上昇し、90日経過後くらいから実験終了時までにはほぼ一定値を示した。実験開始時は活性炭の物理的な吸着効果による除去が主体であるが、この物理吸着効果は低下が早く処理水質は徐々に上昇していく。しかし、約3ヶ月後には生物活性炭の除去効果が発揮されるようになり、ほぼ一定の処理水質を示したものと考えられる。

通水日数とトリハロメタン生成能の積算除去量の関係を第7図に示した。生物活性炭の効果により実験期間中は良好な除去を得、活性炭を長期間使用出来ることが実証できた。しかし、積算除去量のカー

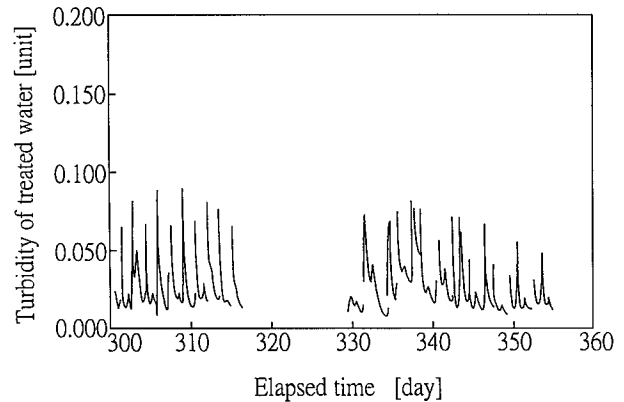
ブはろ過日数に伴い横這いになる傾向を示し、トリハロメタン生成能除去能力が低下していることを現している。活性炭の破過が近づいていると思われる。

この実験フローは自然ろ過処理、生物活性炭処理とも生物を利用したものであり、また凝集剤などの薬品を使用していないため、過剰な生物のリークやろ過層内の濁質の捕捉状態が危惧されるので、生物活性炭処理水の濁度をモニターし確認した。その結果を第8図に示したように、濁度は概ね0.05度以下で常に0.1度以下を示し、クリプトスポリジウム暫定指針に示される数値を満足したので、適切な洗浄



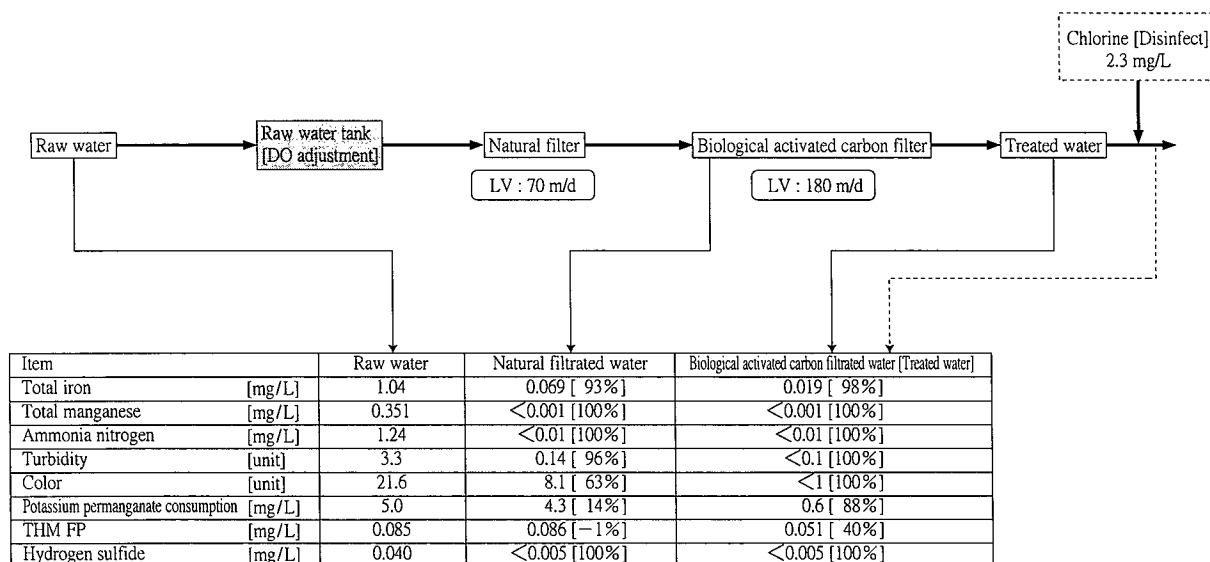
第7図 自然ろ過水に対するトリハロメタン生成能の積算除去率

Fig. 7 Amount of removal quantity of THM-FP biological activated carbon filtration rapid sand filtration



第8図 処理水濁度の経日変化

Fig. 8 Time course for turbidity



第9図 実験結果 (斑鳩町)

Fig. 9 Result of pilot plant (Ikaruga cho)

