

鉄バクテリアを利用したろ過池の除鉄効果とその維持管理

IRON REMOVAL EFFECT OF FILTER BASIN USING IRON BACTERIA, AND ITS OPERATION AND MAINTENANCE

村崎友春*・川村孝一**・大野 操***・小俣新重郎****

Tomoharu MURASAKI, Koichi KAWAMURA, Misao OONO and Shinjuro KOMATA

An iron removal device using iron bacteria was installed in a playfield, located in Mihovillage, Ibaraki prefecture. Water for a landscaping pond in the playfield was to be supplied through a new deep well. However, water quality must be improved because high concentration of iron, 4-5mg/l, was found in raw water. As a method for improving water quality, the iron removal device using iron bacteria, which inhabit in raw water, was utilized for a real facility.

In the device, raw water flows into a filter basin filled with sand and gravel and then iron bacteria are separated from water by sand filtration, due to adsorption of iron bacteria. This device is simple and can save cost.

The device uses slow filtration whose filtration area and rate are 22m² and 10m per day, respectively. Removal of iron was found surely on the next day after raw water began to flow into the device. Iron bacteria accumulated on the surface of the filtration layer require scraping only once a month, and its maximum thickness is 5mm. The device has worked for two years stably without any troubles.

Key Words : iron bacteria, iron removal device, slow filtration, scraping of iron bacteria

1. はじめに

地下水やそれを水源とする水道水に高濃度の鉄が含まれていると、金気の臭味を与えるだけでなく、鉄管の腐食を招いたり、あるいは洗濯衣類や水洗器具等を汚す原因となる。

鉄の除去は、塩素処理、エアレーションなどを単独あるいは組み合わせて前処理設備とろ過池で処理する方法が広く用いられているが、この他にも上記のろ過池を接触ろ過池にしたり、単独で鉄バクテリアを利用して除鉄する方法も行われている。

茨城県美浦村にある総合運動公園内の修景池等の用水は公園脇に設置した深井戸を水源としているが、地下水中に高濃度の鉄が含まれているため、修景池の放流水が赤く濁

るなどの障害が発生し、その対策に長い間苦慮していた。そこで、井戸の掘り直しを含めた原水の水質改善方法を検討し、「鉄バクテリアによる除鉄」が有利であるとの結論に基づき、それを実施に採用した。

本稿では、「光と風の丘公園第7期工事 井戸設置工事」に伴う赤水対策として、平成10年5月に設置した鉄バクテリアを利用したろ過池の構造、除鉄効果、維持管理などについて紹介するとともに、運転開始から約2年経過した現在の稼動状況も併せて報告するものである。

2. 赤水対策の経緯

光と風の丘公園は、村民のやすらぎを癒すことを目的として平成3年（竣工は平成9年）に建設された総合運動公園である。公園の中にあるせせらぎ放流水や野球場の散水に必要な用水はこれまで村の水道に依存していたが、水道料金が嵩むため井戸水に切り替えてそれらの用水を賄うことになった。

* 美浦村 都市計画課（現美浦村教育委員会生涯学習課）
 ** 首都圏事業部 地質部
 *** 首都圏事業部 上下水道部
 **** 総合技術センター

これを受けて、平成9年1月から公園脇に1本の深井戸（表-1）を掘削し、同年3月に設置を完了した。

表-1 井戸諸元

井戸全長	95m
仕上り孔径	250mm
取水対象層	洪積砂層
スクリーン位置	11.5～17.5m, 45.0～55.0m, 82.5～89.5m
取水量(限界)	200ℓ/min

ところが、井戸の設置が完了した僅か数日後の平成9年4月初頭に、“せせらぎに放流した水が赤く濁っている”との赤水発生の一報が入った。直ちに井戸内の水質分析を行い、その直後から赤水が流入していると考えられる上部スクリーンの閉塞（ケーシング）を中心とした井戸の修復作業を行ってきた。しかし、その効果は一向に現れず、修復を始めて半年ほど経過した頃に、対策過程で生じたとみられる損傷によって遂に井戸は修復困難な状態に陥ってしまった。そのため、井戸の掘り直しを含めて原水の水質を改善する種々の検討がなされたが、結論的に鉄バクテリアを利用した除鉄方法が有利であるとの判断に至った。このような経緯を経て除鉄装置の設置に着手したのが赤水発生からちょうど1年後の平成10年4月であった。

3. 原水の特徴

(1) 原水の水質的特徴

揚水直後のせせらぎの放流水は清澄な水であるが、揚水を始めて半日ほど経過した頃から綿状を呈する褐色の浮遊物が水中に浮遊するようになり、さらに時間が経過するとその浮遊物が増えてせせらぎ一面に沈積するようになる。写真-1は赤水で汚染されたせせらぎの近景写真である。当初はさほど気にとめていなかったが、せせらぎに沈積したこの綿状の沈殿物こそ実は鉄バクテリアそのものであることがわかった（写真-2）。原水の水質の特徴は以下の通りであるが、鉄バクテリアは微酸性で、有機物を含んだ水に好んで棲息している¹⁾といわれており、いかに当該地の地下水（原水）が鉄バクテリアの生育環境に適していたかが伺える。

全鉄は4～5mg/ℓで、そのほとんどが二価の鉄イオン(Fe²⁺)である。

pHは6.8～6.9で弱酸性である。

有機物汚濁が大である。



写真-1 赤水で汚れたせせらぎ

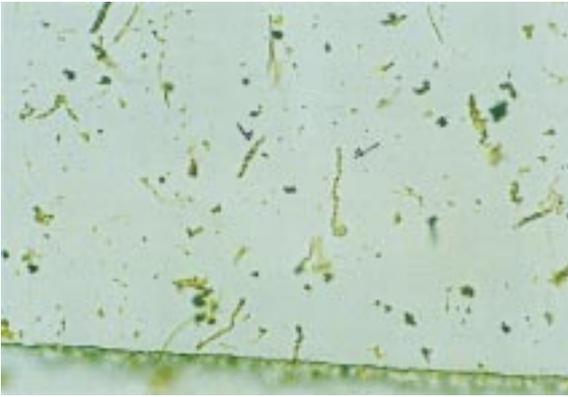


写真-2 せせらぎの湧出口に沈着した鉄バクテリア

(2) 鉄バクテリアの種類

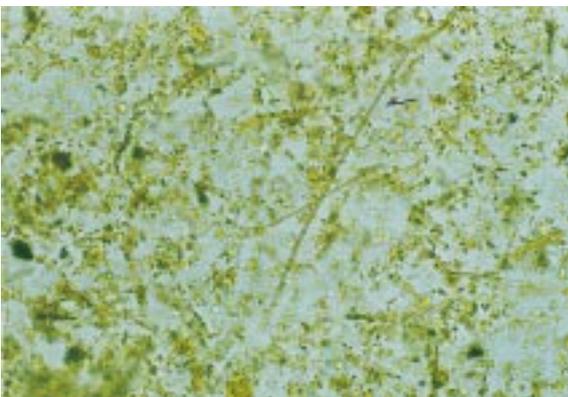
鉄バクテリアは、たとえば小島¹⁾によれば「地下水中に溶存する第一化合物を酸化して不溶性の水酸化第二鉄とし、貯蔵ないし沈殿する機能をもった一群のバクテリアである」といわれている。その数や形態は一定しないが、Dorffは40種の数挙げている。しかし、鉄バクテリアであればどのような種類でも除鉄処理に効果があるのかというと、必ずしもそうではなく現在までにその効果が確認されている鉄バクテリアは*Leptothrix ochracea* Kützing, *Leptothrix trichogenes* Cholodnyと*Gallionella ferruginea* Ehrbgの3種類にすぎない¹⁾⁻³⁾。

当該地では原水中に鉄バクテリアが棲息していることがわかってはいたが、はたしてこの鉄バクテリアが除鉄に効果があるのかを調べる必要があった。そこで、原水と沈殿物を採取してその分析を行った結果、ともに除鉄能力のある*Leptothrix ochracea*および*Gallionella ferruginea*の2種類であることがわかった（写真-3、4）。



矢印のリボン状が Gallionella fe. x400

写真 - 3 原水の顕微鏡写真



矢印のパイプ状が Leptothrix Oc. x400

写真 - 4 沈殿物の顕微鏡写真

4. 赤水対策の検討

井戸の修復が困難となったことを受けて、井戸の掘り直しを含めて原水を水質改善する方法（塩素処理・空気酸化・鉄バクテリア）を検討し、以下のような理由により「鉄バクテリアによる除鉄方法」を採用した。

(a) 井戸の掘り直し

鉄を含んでいない深度まで掘削してそこから取水すれば確実な方法であり、しかも維持管理をほとんど伴わないためコストは井戸設置費だけで済む。しかし、新たな井戸を設置しても、既設井戸の周りに充填してある豆砂利を伝って新設井戸内に赤水が引き込まれてくる可能性があり、この遮水が確実に行われないう限り井戸を掘り直すことが最良の方法とはいえない。

(b) 塩素処理法

大規模な処理施設では実績が多い。しかし、この方法は建設コストが高いことに加えて、運転コストや維持管理費もかかる。そのため、当該地のような処理水量の少ない修景池用水などではコスト的に不利となる。

(c) 空気酸化法

段差水路と沈殿槽を設置して原水を自然に酸化させ、そ

れをろ過装置で浄化させるという方法である。この方法は塩素処理法と同様に建設コストや維持管理費がかかるだけでなく、水路の延長や幅をどのくらいに設定するかなど不明な点が数多くあり、除鉄効果の確実性がない。

(d) 鉄バクテリア法

小規模な処理施設や一般家庭での実績がある。本法はバクテリアを利用するものであることから、薬品はもちろん、エアレーションなどの前処理が一切不要で、操作も容易で、かつ建設コストが安価である。ろ過の過程で繁殖し過ぎたバクテリアを定期的に取り除かなければならないという難点はあるが、当該地のように用地を比較的広く確保できるような場所では、ろ過面積を最大限広くとって緩速ろ過方式にすることで、バクテリアの取り除き頻度を減らすことができる。

5. 鉄バクテリアによる除鉄

(1) 除鉄原理

鉄バクテリアによる除鉄の原理は、地下水中に棲息している鉄バクテリアが、水中に溶存する鉄を酸化して、不溶性の鉄化合物として体の表面や体内に沈着するという性質を利用するものである。

したがって、この鉄バクテリアを原水と接触させて鉄を吸着した後、砂ろ過によって鉄バクテリアと水を連続的に分離させるものである⁴⁾。これは、昔田舎で水の金気を取り除くのに樽に砂や木炭を敷き詰めて濾すという方法と同様の原理である。

(2) 処理方式

1) 処理フロー

井戸から揚水された地下水は一旦地上式貯水槽（容積20m³）に貯留しておき、未処理のまま貯水槽内に設置された圧送ポンプによって高台のせせらぎや野球場に給水していた。これを、揚水後に除鉄処理施設で水処理を行い、除鉄した処理水を貯水槽へ送水するように改めるのである（図-1）。

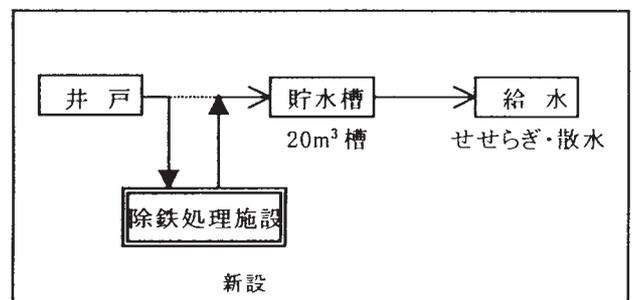


図 - 1 除鉄処理フロー

2) 取水量と処理水量

取水量

取水量は最大200 ℓ/min確保できるが、対策工の過程で揚水時に砂の吸い上げを生じていることが確認された。そのため、砂の吸い上げを生じない最大揚水量を似って時間最大取水量とした。

$$\begin{aligned} \text{時間最大取水量} &= 160 \text{ ℓ/min (実績)} \\ &= 230\text{m}^3/\text{day} \end{aligned}$$

処理水量

導水ロス、作業用水等の損失は見込まず、取水量を全量処理できるものとした。

$$\begin{aligned} \text{一日最大処理水量} \\ &= 230\text{m}^3/\text{day} \end{aligned}$$

3) ろ過速度

水道施設基準⁴⁾による鉄バクテリア処理実施例から、ろ過速度は10～30m/dayを標準とする、とされているので、本施設では安全をみて10m/dayとした。

4) ろ過面積と池数

$$\begin{aligned} \text{ろ過面積} &= \frac{\text{処理水量}}{\text{ろ過速度}} \\ &= \frac{230\text{m}^3/\text{day}}{10\text{m}/\text{day}} \\ &= 23\text{m}^2 \end{aligned}$$

となるが、用地の形状に適合するようろ過面積を22m² (2m × 11m)とした。また、安定的な処理水量を確保するためにろ過池は複数設けるのが効率的であるが、当該施設では通水を中断することが可能であることから1池とした。

(3) ろ過槽(池)の構造

設計に際しては、機械設備や薬品処理を必要とせず、維持管理の容易な施設となるよう留意した。

ろ過槽(池)の構造図を図-2に、ろ過池の近景を写真-5に示す。

1) 形状

形状は長方形とし、簡易な施設とするために掘り割り形式とした。法面には掘り込み後遮水シートを敷設し、その上をコンクリートで保護した。また、周壁天端は掘削と埋戻しの土量バランスを考慮し、現地盤より60cm高くした。

2) ろ過層

池の深さは1.8mとし、その中に下から集水管防護用玉石20cm、砂利30cm、砂50cmを敷設し、その上に水深50cmと余裕高30cmをとった。このうち、ろ過層については水道施

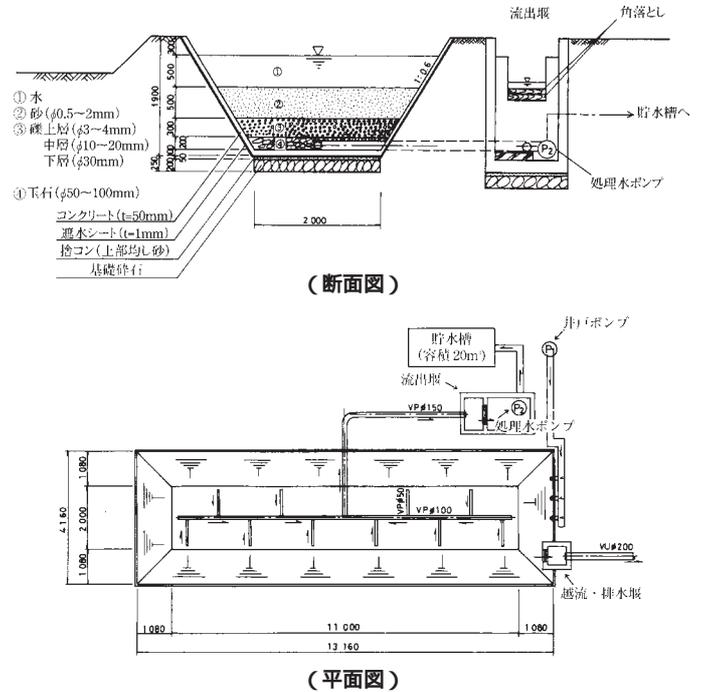


図-2 ろ過槽(池)の構造図



写真-5 ろ過池の近景

設基準⁴⁾の緩速ろ過池を参考に、以下のような構成とした。

- ろ過砂 : 川砂50cm (0.5～2mm)
- ろ過砂利 : 上層10cm (3～4mm)
- 中層10cm (10～20mm)
- 下層10cm (30mm)
- ろ過層 : 合計80cm
- 下部集水用 : 玉石20cm (50～100mm)

3) 洗浄設備

ろ過池の構造は、緩速ろ過池に準じた場合でもろ過継続日数を大きくとれるよう逆流洗浄や表面洗浄を設ける場合もある。しかし、当該地では施設の簡易化および煩雑な維持管理を避けるために、これらの装置は設けないことにした。

4) 流入設備

鉄バクテリアを利用するためには処理水中に溶存酸素が

必要となる。そのため、流入部は開放して曝気できるよう、また、水張り時に砂面を洗掘しないよう壁伝いに間接的に流入する構造とした。

5) 下部集水設備

多孔管（塩ビ管）を集水管として敷設し、その周りに塩ビ管を防護するための玉石を敷き詰めた（写真 - 6）。

6) 流出設備

一般には可動堰、オリフィス等の流量調節装置を設けるが、本施設では角落としを設け、送水ポンプの水位運転により対応することにした。

7) 越流・排水設備

越流および排水は一つの柵で兼用し、角落としにより水位調整と利用の便を図ることにした。また、越流水および清掃時の排水は隣接する調整池の排水側溝へ放流することにした。

6. ろ過池の運転

(a) 湛水時

ろ過池内に水を張る時は、一般にろ過水を逆送して池底から徐々に水位を上げ、砂層内の空気を抜きながら満水状態にする。しかしながら、本施設では逆流洗浄設備を設けないことから、井戸から流入管を通して原水を入れ、砂層を乱さないように上部から注水する。

(b) 初期運転時

設計段階ではろ過損失水頭（池内水位 - 流出排水位）が明らかでない。そのため、

流出堰の角落としは、計画水位から越流水深分だけ低くして、最低水位を設定する。

越流堰の角落としは、計画水位から10cm程度高くして池内の最高水位を設定する。

の状態（ろ過水頭50cm程度）に設定して、ろ過を開始する。

(c) ろ過停止時

ろ過層表面に鉄バクテリアが蓄積し目詰まりを生じれば、通水量の低下とともに池内水位が上昇し越流が始まる。



写真 - 6 集水管と防護用玉石の敷設

この時、越流堰の角落としを追加し池内水位を上げることができ、通常はこの時点でろ過を停止し、砂層表面に蓄積した鉄バクテリアの除去作業が必要となる。

(d) ろ過膜の除去時

ろ過膜の除去作業を行うためには、あらかじめ池内水位を砂層面より下まで低下させておくことが必要である。その手順は以下の通りである。

越流堰の角落としをすべて外し、池内水位を砂面上まで低下させる。

流出堰の角落としを1枚か2枚外し、池内水位を砂面より10~20cm低下させる。

流出堰の水位が低下した時点で送水ポンプを停止する。池内に蓄積した鉄バクテリアの除去を行う。

作業終了後は、湛水時と同様の工程を行う。

(e) 冬期間の停止および再開時

冬期間に停止する場合、コンクリートのひび割れ等による劣化を防止するため、池内は水を張ったままにしておく。また必要に応じて、再運転時に掻き取りによって減少した砂の補充を行う。

(f) 池を空にする場合

ろ過層の入れ替え等で池内を空にする場合は、次の手順による。

井戸の揚水ポンプを停止する。

越流堰の角落としを外し、砂面上の水を排水する。

流出ポンプピットの水位が低下した時点で人がその中に入り、流出バルブを開けて、送水ポンプを運転させておく。

(g) ポンプ運転

ろ過膜の除去作業時、点検時などを除いて原則的に以下のような運転を行う。すなわち、ポンプは日昼8時間（8:00~16:00）は二次側で給水が必要な時だけ運転し、夜間16時間（16:00~8:00）は4時間ごとの間欠運転とする。これらの切り替えは新設制御盤内に組み込んだ2系統のタイマーによって行う。なお、夜間に間欠運転させる理由は、鉄バクテリアの活動を妨げない範囲（8時間程度までは原水を補給しなくても鉄バクテリアは死滅しないといわれるが、安全を考慮して4時間としている）で通水してやる必要があることによる。

7. 除鉄効果

6(a)(b)の要領でろ過池内への通水を開始した結果、通水を開始したその翌日には既にろ過砂の表面に赤錆状の汚泥が薄く沈着しているのが認められ、鉄バクテリアの繁殖力の旺盛さを伺わせた。そこで、流出堰から越流してきたろ過水の水质をチェックしたところ、つい最近まであれ

ほど金気があって汚れていた井戸水が見違えるほど澄んだきれいな水になり、臭味も消えた。そして、バクテテストによる鉄濃度測定とお茶投与による判定（タンニンを利用した定性的な2価鉄イオンの検出法で、鉄との反応により水は青黒色を呈する）を行った結果においても、ともに鉄分の反応は全くなく、鉄バクテリアの顕著な除鉄効果を確認することができた。

新しいろ過池では、原水を流し込んでから10～15日ほど経たないと鉄バクテリアが十分に繁殖せず、また、除鉄も不十分であるといわれている^{1,2)}。このような早い段階で鉄バクテリアが繁殖し、そして除鉄が行われたのは、当該地の原水が鉄バクテリアの生育に適していたことに加えて、除鉄効果の高い複数の鉄バクテリアが棲息していたことが、このような好成绩をもたらしたのではないかと推測される。

表 - 2 は通水を始めて3日後に採取したろ過水の水質分析結果である。これによると、大腸菌群を除くすべての項目が水道法に基づく水質基準値を下回っていることがわかる。特に、処理前に4～5mg/ℓも含まれていた鉄が処理後には同基準値を2桁も下回る0.03mg/ℓ未満にまで改善されたことは注目すべきことである。なお、唯一検出された大腸菌群は原水中に含まれていたのか、それともろ過層

表 - 2 ろ過水の水質分析結果

1998.7.2			
一般細菌(個/ml)	6	1,3-ジクロロプロベン	0.0002
大腸菌群	検出	シマジン	0.0003
カドミウム	0.001	チウラム	0.0006
水銀	0.00005	チオベンカルブ	0.001
セレン	0.001	亜鉛	0.007
鉛	0.001	鉄	0.03
ヒ素	0.001	銅	0.01
六価クロム	0.005	ナトリウム	10.7
シアン	0.001	マンガン	0.036
硝酸性窒素および 亜硝酸性窒素	0.2	塩素イオン	9.1
フッ素	0.008	カルシウム、 マグネシウム等(硬度)	109
四塩化炭素	0.0002	蒸発残留物	213
1,2-ジクロロエタン	0.0004	陰イオン界面活性剤	0.02
1,1-ジクロロエチレン	0.001	1,1,1-トリクロロメタン	0.001
ジクロロメタン	0.001	フェノール類	0.005
ジス-1,2-ジクロロメタン	0.001	過マンガン酸	
テトラクロロエチレン	0.001	カリウム消費量	1.6
1,1,2-トリクロロエタン	0.0006	pH値	7.3
トリクロロエチレン	0.001	味	異常なし
ベンゼン	0.001	臭気	異常なし
クロロホルム	0.001	色度(度)	1
ジブロモクロロメタン	0.001	濁度(度)	0.1
ブロモジクロロメタン	0.001		
ブロモホルム	0.001		
総トリハロメタン	0.001		

単位: mg/ℓ

に含まれていたのか明らかでないが、通水を開始してから3日しか経っていないことを考慮すると、今後ろ過を継続することにより除去される可能性がある。

写真 - 7 は、赤水で汚れたせせらぎを除鉄後に清掃して放水を始めた時の写真である。除鉄後のせせらぎはこれまでの赤く濁るといったような障害も全くなく、本来あるべき姿を取り戻した。

8. 維持管理

鉄バクテリアを利用した処理施設の維持管理では、処理水とその水量の安定的な確保を継続させるために、ろ過層の表面に蓄積したろ過膜(鉄バクテリア)を定期的に取り除く必要がある。

(a) ろ過膜の除去頻度とその厚さ

第1回目のろ過膜の取り除きを行ったのは、通水を開始した約1ヶ月後である。池内水位は通水を始めて2週間ほど経過した頃から徐々に高くなり、通水直後160ℓ/minあった水量がろ過膜を取り除く直前には1/3以下にまで減少していた。このように、ろ過膜がある一定の厚さになると目詰まりを生じやすく、それに伴ってろ過能力が低下するが、当初予想していたよりも持続時間は長い傾向にある。なお、このろ過水量の減少に対しては、夜間(計8時間のポンプ運転)のうちに満杯になった20m³貯水槽により対応することにした。

現在までに冬場を除いて5回ろ過膜の除去作業を行っているが、その間隔はおよそ1ヶ月に1回で、その時の厚さはいずれも5mmほどである。

(b) ろ過膜の除去とそれに要する時間

ろ過膜の除去方法は、砂面下まで水位を低下させた後、前述のようにろ過層を踏み固めないようにろ過層の上に広めの板を敷き、その上から砂の表面に蓄積したろ過膜のみを熊手などを使って掻き取るだけであり、特別な技術は一切不要である(写真 - 8、9)。この掻き取りに要する時



写真 - 7 除鉄後のせせらぎ放水状況



写真 - 8 ろ過池内に蓄積した鉄バクテリアとその除去状況



写真 - 9 鉄バクテリアの除去後

間は3人で90分ほどである。

(c) ろ過砂の補充

本施設では緩速ろ過方式を採用しているため、ろ過膜となる鉄バクテリアは基本的にろ過砂の表面に繁殖するだけである。しかも、ろ過膜は比較的容易に砂面から剥れるため砂をほとんど掻き取ることはなく、これまで1度も砂の補充は行っていない。

9. おわりに

鉄バクテリアにより地下水中の鉄を除去する方法は、大正末期に発見されて以来各地で行われてきた。発見当初は自然発生的なものが多く処理実績もそれほど多くはなかったが、除鉄メカニズムが明らかにされて以来その数も次第に増え、今では小規模な水道施設や団地の給水あるいは工場用水などでかなりの処理実績がある。

今回、高濃度の鉄を含んだ水源井にこの鉄バクテリアによる方法を適用した結果、原水中の鉄が確実に除去されたことを確認した。この方法は装置が簡易で、建設コストが安価であるだけでなく、維持管理に特別な技術や経験を必要としない。そのため、今回適用したような修景池等の場

合、維持管理作業としてはろ過膜の取り除き程度となるため、公園管理の一部として行うことも可能である。ただし、本法の適用にあたっては、あらかじめ原水中に除鉄効果のある鉄バクテリアが棲息していることを確認する必要がある他、水質変動の激しい地表水には適用困難であるという制約がある点にも注意が必要である。

本施設は運転を開始してから約2年を経過したが、春先の再開時を含めてトラブルもなく安定した稼働を続けている。

本施設を導入するにあたり、おいしい水作りの世界的な権威である小島貞男先生に多大なご教授ならびにご指導をいただいた。ここに深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小島貞男：鉄バクテリアによる除鉄、用水と廃水、Vol.3-10、pp.45-52、1961
- 2) 小島貞男：生物をつかった除鉄・除マンガン処理、用水と廃水、Vol.14-6、pp.59-65、1972
- 3) 高井 雄、中西 弘：用水の除鉄・除マンガン処理、産業用水調査会、pp.195-204、1987
- 4) 日本水道協会：水道施設設計指針・解説、pp.230-305、1990