

# 粒状活性炭吸着による浄水場の高度処理

## Advanced Water Treatment with Granular Activated Carbon at A Purification Plant



環境装置部 計画第2課  
石丸 豊  
Yutaka Ishimaru

Water sources such as rivers and lakes have been contaminated as a result of recent urbanization and industrialization in the vicinity of water sources. To eliminate such a hazard, an advanced water treatment system using granular activated carbon was installed at the Rokuha Purification Plant in Kusatsu City, Shiga Prefecture. No complaints on seasonal surges of objectionable odor and taste have been reported since the start of the operation in May 1992.

### まえがき

わが国の近代水道は、明治20年（1887年）の横浜市における創設から100余年を経て今や約94%の水道普及率に達し、国民生活に欠くことの出来ないものとなっている。

しかしながらその間の急激な都市化や工業化に伴い水道水源である湖沼や河川の汚染が進み、特に湖沼では富栄養化による異臭味被害や浄水障害が増加している。また微量化学物質による地下水汚染やゴルフ場の農薬による水道水源への混入等も、大きな社会問題となってきた。

このような背景ならびに、国民の生活様式の多様化、高度化が相まって「より安全でおいしい水」に象徴される高品質の水道水が要求されている。

当社は特に、水道の異臭味被害人口が一番多い琵琶湖・淀川水系に位置するため、早くから高度浄水処理技術の開発に努めてきた。

現在、水源や水質により種々のプロセス（生物、オゾン、活性炭処理）の実証レベルでの研究開発に取り組んでいるが、本報では滋賀県草津市ロクハ浄水場に納入した粒状活性炭吸着による高度浄水施設について報告する。

### 1. 高度浄水処理施設導入までの経緯

草津市の水道は、昭和39年（1964年）に計画人口4万人1日最大給水量8800m<sup>3</sup>/日で創設され、その後の都市化の進展に対応し現在、第3次拡張事業の一部完成により給水能力は59350m<sup>3</sup>/日となっている。浄水場としてはロクハ浄水場（給水量39600m<sup>3</sup>/日）及び北山田浄水場（同19750m<sup>3</sup>/日）の2浄水場があり、水源は琵琶湖（南湖）表流水である。この琵琶湖南湖では、昭和56年（1981年）以降毎年かび臭の発生があり、例年6～7月と8月あるいは9～10月の間の2度にわたっての発生が恒常化の傾向にある。

ロクハ浄水場では、かび臭発生時には粉末活性炭の注入（5～15ppm 50%wet）で低減をはかっていたものの、着水井前の導水管内に注入しているため接触時間も充分でなくまた高濃度のかび臭発生時には、除去率の限界より完全とはいえず、住民よりの苦情対応に苦慮している現状であった。このため平成元年（1989年）9月、市議会で高度浄水施設の調査設計費としての補正予算が認められ同10～

12月大手水処理プラントメーカー8社による「ロクハ浄水場高度浄水施設」設計コンペが実施された。

コンペの内容として、高度処理方式の選定にあたり、Ⅰ案は活性炭処理によるものとし、Ⅱ案は、その他の方式を提案するものであり、処理目的は異臭味の除去であった。よって当社はⅠ案として種々の検討の結果、粒状活性炭吸着（固定床）を提案し、Ⅱ案はTHM低減等を考慮しオゾン+活性炭処理を提案した。平成2年（1990年）2月草津市の審査により、建設費のみならず、既設浄水場内への建設工法の妥当性、維持管理、運転費等が総合的に評価された結果、当社が当選と決定した。その後「変更認可設計業務」引続き「実施設計業務」の委託を経て、平成3年（1991年）5月「ロクハ浄水場高度浄水施設整備工事」が平成4年（1992年）3月末の工期で建設発注がなされ、計画から設計・建設まで一貫して当社が担当した。

### 2. 活性炭処理の概要

#### 2.1 活性炭<sup>1)</sup>

活性炭とは、炭素を主成分とする多孔質体の総称で、気体や液体中の微細な不純物を吸着する性質を有しており、原料や賦活方法により次に示すように多くの種類がある。

分類方法	種	類
原料	木質系	やしがら、木材、おがくず等
	石炭系	泥炭、亜炭、褐炭、瀝青炭等
	その他	石油ピッチ、合成樹脂、有機質廃物等
賦活方法	薬品賦活	塩化亜鉛、硫酸塩、リン酸等
	ガス賦活	水蒸気、炭酸ガス、空気等
	その他	薬品と水蒸気の併用等
形状	粉末炭	200メッシュ以下、薬品賦活、ガス賦活
	粒状炭	破碎炭、成形炭等、ガス賦活
用途	気相用	溶剤回収、悪臭除去、クロマト剤等
	液相用	精糖、医薬、醸造、油脂、浄水等
	その他	触媒、添加物等

## 2.2 活性炭の吸着能力

水処理に用いる活性炭の吸着能力を判定する指標として、メチレンブルー脱色力やよう素吸着量があるが、臭気などの微量成分に対しては吸着試験を実施し評価する機会が多い。

吸着試験としては、回分式試験及びカラム試験があり平衡吸着量と吸着速度を測定する目的で行う<sup>2)</sup>。平衡吸着量は吸着等温線、すなわち一定温度での液濃度Cとその濃度に対する最大の吸着量（平衡吸着量）Qとの関係で表わされる。吸着等温線にはいくつかの型があるが、代表的なものに、フロイントリッヒ (Freundlich) 型、ラングミュア (Langmuir)型、ヘンリー (Henry) 型などがあげられ、とりわけフロイントリッヒの吸着等温式で整理できることが多い<sup>3)</sup>。(第1図)

フロイントリッヒ式は(1)式で表わされ、初めから実験式として提案され、種々の液相吸着の場合に広い範囲で適合することが多い。(1)式の両辺の対数をとると(2)式になりCとQとの関係を両対数で図示すれば直線関係が得られ、その勾配から1/nが、またC=1のときのQからkが求められる。

$$Q = k C^{1/n} \quad (1)$$

$$\log Q = (1/n) \log C + \log k \quad (2)$$

ここに Q: 活性炭単位質量当りの吸着量 (g/g-AC)  
C: 活性炭吸着後の平衡濃度 (g/cm<sup>3</sup>)

k, n: 定数

フロイントリッヒ式において、1/nの値が0.1~0.5のときは低濃度でよく吸着され効果的であるが、1/nが2以上のときは使用活性炭量を増加しても被吸着物質濃度が低下するに従って吸着量が著しく低下するので効果的でない<sup>4)</sup>。

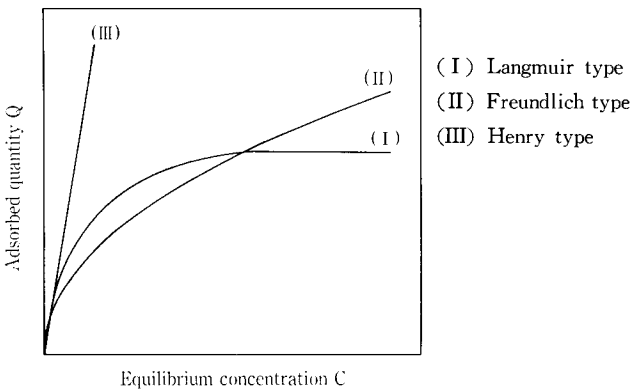
## 2.3 活性炭による異臭味の除去

### 2.3.1 異臭味物質

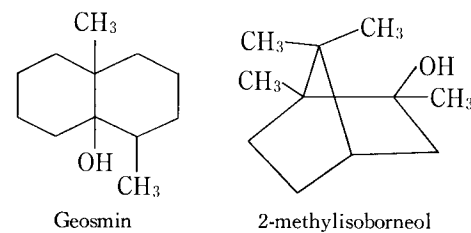
琵琶湖・淀川水系における異臭味問題の原因は主としてかび臭にある。このかび臭物質として、現在確認されているのは、2-メチルイソボルネオール（以下、2-MIB）とジェオスミンの2種類であり第2図にそれらの構造式を示す。

これらのかび臭物質は、琵琶湖南湖で発生する植物プランクトンの中でも藍藻類の *Phormidium tenue*, *Oscillatoria tenuis*, *Anabaena macrospora* が原因生物とされており、*P. tenue*と*O. tenuis*が2-MIBを、*A. macrospora*はジェオスミンを産出するとされている。また、これらかび臭の閾値は10 ng/l程度と非常に低く (ng/l = 10<sup>-9</sup> g/l)、既存の浄水プロセス（凝集沈澱 + 砂汙過）では除去できず、新たに高度処理プロセスを付加する必要がある<sup>5)</sup>。

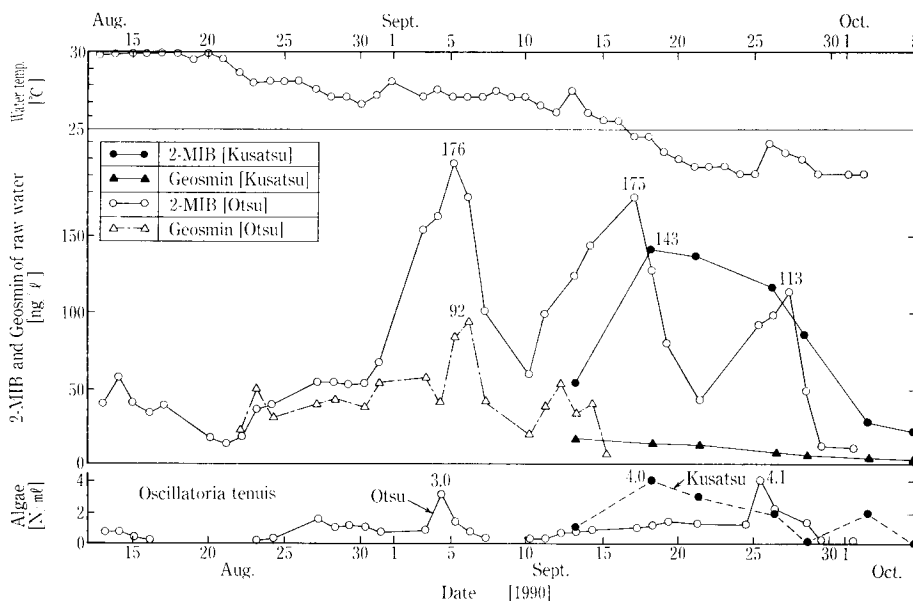
第3図は1990年夏～秋季における琵琶湖南湖より取水し



第1図 吸着等温線<sup>4)</sup>  
Fig. 1 Adsorption isotherms



第2図 臭気物質構造式  
Fig. 2 Structural formula of musty materials



第3図  
原水のかび臭と生物の変化（大津市新瀬田浄水場、草津市ロクハ浄水場）<sup>6)</sup>  
Fig. 3  
Variation of 2-MIB, Geosmin and Algae (Shinseta plant of Otsu city and Rokuha plant of Kusatsu city)

ている大津市（膳所，新瀬田浄水場）及び草津市（ロクハ浄水場）の原水のかび臭の変化を示す。この期間におけるかび臭物質は主として2-MIBであり，その濃度の増減が *Oscillatoria tenuis* の個体数の増減とよく一致していることより同時期における原因生物は *O. tenuis* と思われる。

### 2. 3. 2 異臭味物質の除去

第4図に2-MIBとジェオスミンの吸着等温線を示す。図から2-MIB及びジェオスミンの平衡吸着量はフミン酸の共存により影響を受けることがわかる。よって実際の処理対象となる原水は同様に多成分系であり，種々の活性炭の吸着能の評価を行うには対象原水を用いた吸着試験が必要となる。

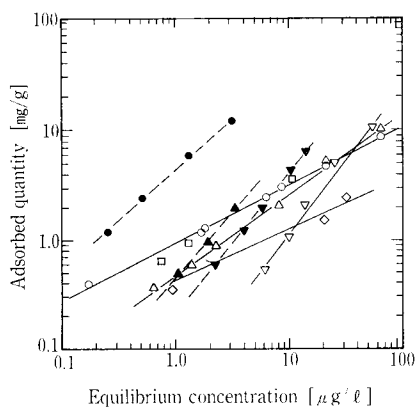
第5，6図は大阪市水道局のパイロットプラントによる2-MIB除去の結果である。フローは凝集沈澱—急速河過—粒状活性炭（GAC）吸着で，前塩素処理した場合（有塩素系）と塩素処理しない場合（無塩素系）を示す。

有塩素系では2-MIBの除去率が通水日数により低下しているが，無塩素系では通水日数に関係なく，水温の高い時期に2-MIBの除去率も高いことからGAC層内における生物化学的酸化作用の影響を受けていると推定される<sup>8)</sup>。

### 2. 3. 3 処理フロー

処理フローの選択に際しては除去対象ならば

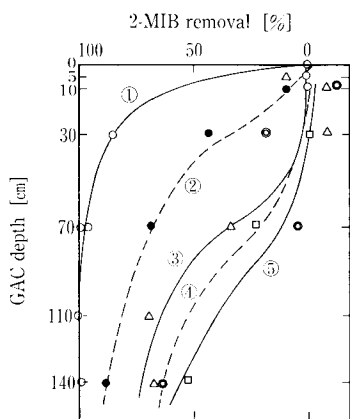
に原水性状を充分加味し決定されるが，ロクハ浄水場における除去対象はかび臭を主とした異臭味であり，同一水源より取水している大津市新瀬田浄水場が粒状活性炭による処理で効果を上げていることから第7図に示す処理フローとし，異臭味の発生時に弁を切換え，現行浄水プロセスに活性炭処理が付加できるものとした。またロクハ浄水場は，公道を隔てて旧館（東側，浄水量11300 m<sup>3</sup>/日），新館（西側，同28300 m<sup>3</sup>/日）の2カ所の浄水施設で構成されるため，各々に活性炭吸着設備を配置した。



2-MIB	○	DI-Dist. pH 5.5
	□	DI-Dist. pH 8.5
	△	100 mg/l Humic acid
	▽	10 mg/l Humic acid
	◇	Well water
Geosmin	●	DI-Dist. pH 5.5
	▲	10 mg/l Humic acid
	▼	40 mg/l Humic acid

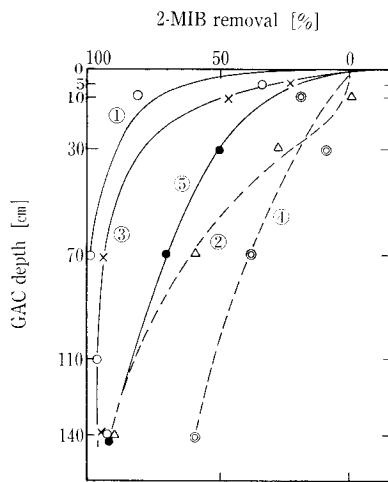
GAC: CALGON F200  
DI: Deionized  
Dist.: Distilled

第4図 2-MIBとジェオスミンの吸着平衡<sup>7)</sup>  
Fig. 4 Adsorption of 2-MIB and Geosmin



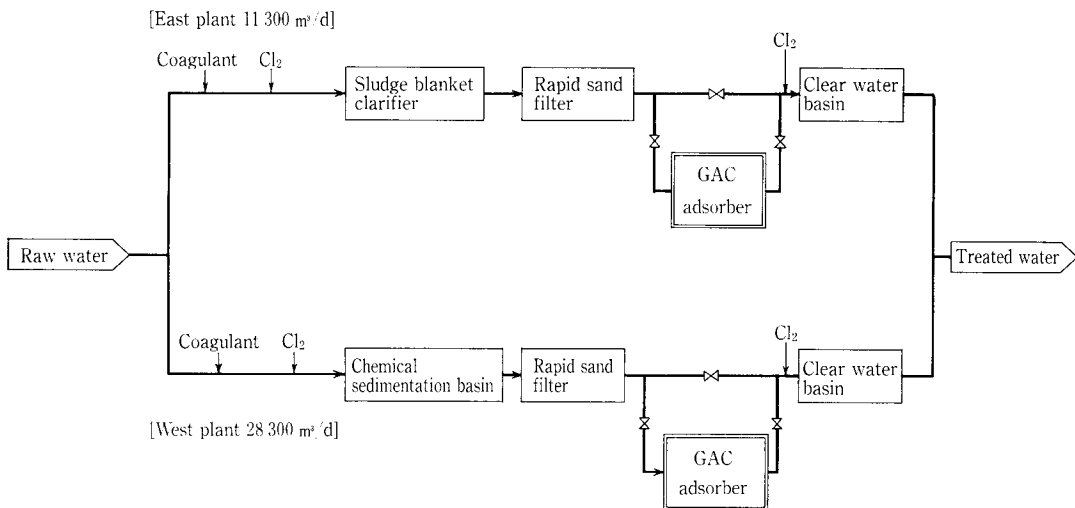
No.	Influent conc. 2-MIB [ng/l]	Operating time [days]	Water temp. [°C]
①	14	27	21.5
②	98	233	6.0
③	88	352	20.0
④	290	597	5.5
⑤	86	728	25.0

第5図 GAC吸着による2-MIBの除去（有塩素系）  
Fig. 5 Removal of 2-MIB by GAC adsorption (Chlorinated water)



No.	Influent conc. 2-MIB [ng/l]	Operating time [days]	Water temp. [°C]
①	44	9	21.5
②	91	261	6.0
③	140	380	20.0
④	200	625	5.5
⑤	215	1244	16.0

第6図 GAC吸着による2-MIBの除去（無塩素系）  
Fig. 6 Removal of 2-MIB by GAC adsorption (Nonchlorinated water)



第7図 ロクハ浄水場浄水プロセス  
Fig. 7 Water treatment process of Rokuha plant

### 2. 3. 4 活性炭の選定

活性炭（粒状）の選定にあたっては、石炭系及びヤシガラ系の市販の粒状活性炭で等温吸着平衡試験ならびに高速カラムテストを実施し比較した。指標は  $\text{KMnO}_4$  消費量とし原水を用いた。その結果、飽和吸着量及び50%破過時間とも石炭系がヤシガラ系を上まわった。よって活性炭は石炭系を選定した。また臭気制御目標値までの破過日数を実績より150日と設定し、再生は年1回を基本に活性炭容量を計画した。

## 3. 活性炭吸着設備の概要

### 3. 1 設備仕様

#### 3. 1. 1 設計条件

処理水量（旧館）11 300  $\text{m}^3/\text{日}$   
（新館）28 300  $\text{m}^3/\text{日}$

処理方式 粒状活性炭吸着，下向流固定層式

その他の諸元は、水道施設設計指針・解説（日本水道協会）、高度浄水施設技術資料（同）の基準に準拠したものである。

#### 3. 1. 2 活性炭吸着設備（第8図，写真1，2）

##### 1) 構造

形式：鉄筋コンクリート造  
自然平衡形全自動サイフォン式

線速度(LV)：300  $\text{m}/\text{日}$  (12.5  $\text{m}/\text{h}$ )

空間速度(SV)：6.25  $\text{l}/\text{h}$

層高：2.0  $\text{m}$

池数：（旧館）2池  
（新館）4池

吸着面積：（旧館）19.04  $\text{m}^2/\text{池}$   
（新館）23.78  $\text{m}^2/\text{池}$

洗浄方法：表洗—表逆洗—逆洗—捨水

##### 2) 粒状活性炭

種類：石炭系（瀝青炭）

粒度分布：1.68  $\text{mm}$  以上5%以下，0.42  $\text{mm}$  以下4%以下

平均粒径：0.9~1.1  $\text{mm}$

均等係数：1.5~1.9

硬度：90%以上

よろ素吸着量：1 050  $\text{mg}/\text{g}$  以上

比表面積：1 050~1 250  $\text{m}^2/\text{g}$  ( $\text{N}_2$ , BET 法)

充填密度：450  $\text{kg}/\text{m}^3$

乾燥減量：2%以下

その他：pH調整(8.6以下)，洗浄処理

##### 3) 下部集水装置

形式：A/W式レオポルドブロック(有孔ブロック)

材質：硬質ポリエチレン

支持床：河過砂利 2~20  $\text{mm}$ ，厚さ 200  $\text{mm}$  (4層)

##### 4) 排水トラフ

形式：U字型トラフ

材質：FRP

##### 5) 表洗装置

形式：固定式表洗装置

材質：SUS304

##### 6) サイフォン管装置

種類：流入，吸着，逆洗サイフォン

材質：SUS304

##### 7) 揚水ポンプ

形式：水中斜流ポンプ

容量：（旧館）3.3  $\text{m}^3/\text{min} \times 10 \text{ m} \times 11 \text{ kW}$   
（新館）8.3  $\text{m}^3/\text{min} \times 10 \text{ m} \times 22 \text{ kW}$

台数：各3台

##### 8) 表洗ポンプ

形式：水中渦巻ポンプ

容量：（旧館）1.9  $\text{m}^3/\text{min} \times 15 \text{ m} \times 11 \text{ kW}$   
（新館）2.4  $\text{m}^3/\text{min} \times 15 \text{ m} \times 11 \text{ kW}$

台数：各2台（内1台予備）

##### 9) 真空ポンプ

形式：水封式

容量：（旧館）max 0.65  $\text{m}^3/\text{min} \times 700 \text{ mmHg} \times 1.5 \text{ kW}$

（新館）max 1.0  $\text{m}^3/\text{min} \times 700 \text{ mmHg} \times 2.2 \text{ kW}$

台数：各2台（内1台予備）

##### 10) 空気圧縮機

形式：圧力開閉器式オイルフリー

容量：（旧館）45  $\text{l}/\text{min} \times 7 \text{ kgf}/\text{cm}^2\text{G} \times 0.4 \text{ kW}$   
（新館）75  $\text{l}/\text{min} \times 7 \text{ kgf}/\text{cm}^2\text{G} \times 0.75 \text{ kW}$

台数：各2台（内1台予備）

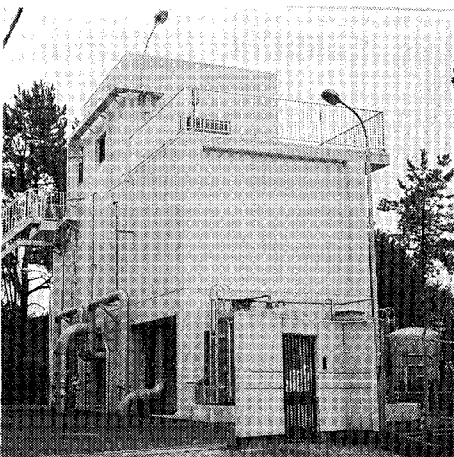


写真1 活性炭吸着設備（旧館）  
Photo. 1 GAC adsorber (East plant)

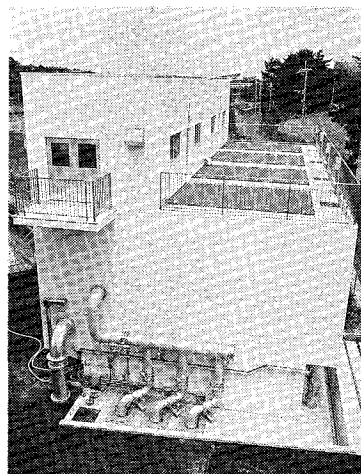
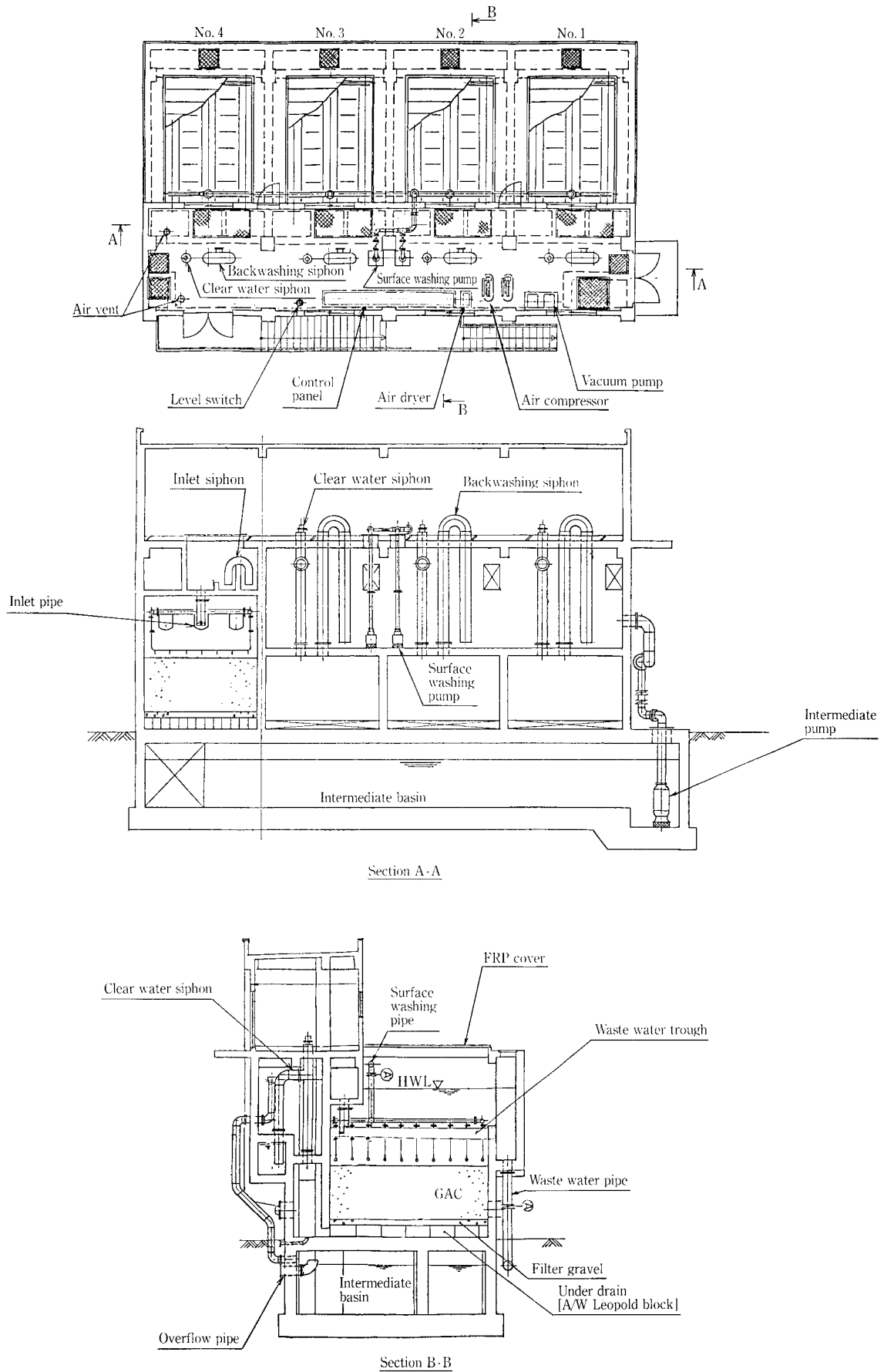


写真2 活性炭吸着設備（新館）  
Photo. 2 GAC adsorber (West plant)



第8図 活性炭吸着設備（新館）  
 Fig. 8 Schematic drawing of GAC adsorber (West plant)

第 1 表 GACによるかび臭の除去結果 (1992年)

Table 1 Removal of earthy-musty taste and odor by GAC (1992)

Date	2-MIB ng/l [ppt]						Geosmin ng/l [ppt]					
	East plant			West plant			East plant			West plant		
	Influent	Sand filter effluent	GAC effluent	Influent	Sand filter effluent	GAC effluent	Influent	Sand filter effluent	GAC effluent	Influent	Sand filter effluent	GAC effluent
'92 6/23	25	20	<5	20	16	<5	7	6	<5	7	12	<5
6/30	59	55	<5	63	61	<5	7	7	<5	8	14	<5
7/ 7	20	16	<5	11	10	<5	6	7	<5	6	13	<5
7/15	8	6	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	13	<5
7/21	10	9	<5	10	9	<5	<5	6	<5	6	12	<5
7/28	12	12	<5	16	13	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5
8/ 4	190	140	<5	400	170	<5	6	<5	<5	<5	11	<5
8/11	93	78	<5	180	110	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
8/18	130	110	<5	190	130	<5	5	8	<5	7	5	<5
8/25	33	31	<5	42	40	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
9/ 1	20	15	<5	24	24	<5	<5	7	<5	9	<5	<5
9/ 8	17	17	<5	22	19	<5	9	8	<5	9	5	<5
9/14	23	19	<5	26	20	<5	6	7	<5	6	<5	<5
9/22	28	25	<5	33	28	<5	6	8	<5	6	8	<5
9/29	41	39	<5	52	40	<5	11	12	<5	11	10	<5
10/ 6	41	37	<5	56	48	<5	10	9	<5	11	14	<5
10/13	26	25	<5	24	23	<5	<5	9	<5	6	7	<5
10/20	30	29	<5	26	19	<5	<5	6	<5	<5	5	<5
10/27	18	19	<5	20	14	7	<5	9	<5	<5	<5	<5
11/ 2	11	10	<5	11	10	<5	<5	5	<5	<5	6	<5
Max.	190	140	<5	400	170	7	11	12	<5	11	14	<5
Min.	8	6	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ave.	42	36	<5	62	40	<5	4	6	<5	5	7	<5

11) 空気除湿器

形式 : 冷凍式

容量 : max 330 l/min, 露点圧力下 5 ~ 15 °C

台数 : 旧・新館各 1 台

3. 2 設備の特長

本吸着池の構造は、急速ろ過池として実績の多い当社の開放型サイフォン・フィルターが基本となっているが、活性炭吸着池用として新しい機構を加えたものである。このたびのロクハ浄水場における設備の建設条件としては、既設の運転に支障を与えることなく浄水プロセスに組込む必要があった。すなわち設置位置（場所、面積、水位高低等）に制約を受けるため設備寸法は極小を要求される。反面、活性炭の洗浄時間は10~20分と砂ろ過池より長く、逆洗水貯槽保有形のろ過池であればより大きな容量を要することとなる。この問題を解消すべく本吸着池は、

(1) 地下に急速ろ過池のろ過水を受ける中間水槽を設け階層構造にしたこと。

(2) 中間水槽からのろ過水は逆洗水貯槽に揚水し、各吸着池への流入は、この逆洗水貯槽より流入サイフォンを介して行う流入機構としたことが特長である。

次に本設備の特長をまとめると、

1) 設置面積が極めて少ない

・前述(1), (2)の機構及び開放型サイフォン・フィルターが有する合理的な構造のため設置面積が、ポンプ・配管等の補機類も含めて極めて少なく現有敷地内での建設が容易となった。

2) 洗浄効果が高い

・通常運転中は、前述(2)の機構により洗浄時間に制限がなく適切な設定が可能となる。

・洗浄水には砂ろ過水（有塩素水）を使用できるため、支持床等での微生物繁殖が防止できる。

3) 省エネルギーである。

・揚水ポンプの運転は中間水槽への流入流量により台数制御を行っている。  
・大容量の逆洗ポンプや補給水ポンプが不要である。

4) 運転管理が容易

・吸着池が各池独立しているため処理水量に合せた池数の運転が行える。  
・処理水の流出水位は活性炭層より高いため、損失水頭が上昇しても負圧が発生しないため安定した処理が出来る。  
・流出水位が一定の自然平衡形であるため水量をコントロールする制御機器が不要である。

4. 運転状況

'92年4月に延9日間の試運転を経て処理水質の確認後、異臭味発生に備えて5月15日より供用を開始し、同年11月異臭味の終息に合せて休止するまで約6カ月間運転が行われた。その間の草津市水道部によるかび臭物質の定量分析結果を第1表に示す。運転初期の6月には例年通り砂ろ過処理水は閾値を越えるかび臭物質濃度となっているが、GAC処理水は2-MIB, ジェオスミン共、定量限界の5 ng/l以下となっている。また運転期間を通して2-MIBの最高値は新館の8月4日のデータで原水が400 ng/l, 砂ろ過処理水で170 ng/lを記録したが、GAC処理水は5 ng/l以下であり、異臭味による市民の苦情発生はなかった。表中のデータで、旧館(East plant), 新館(West plant)の原水のかび臭物質濃度が異なるのは、旧館は琵琶湖より取水した原水をいったん、ロクハ貯水池(有効容量約10万

m<sup>3</sup>)に導水し、その貯水池より取水しているため直接琵琶湖原水を着水井に受けいれている新館と差異が出たものと思われる。

GAC 1 m<sup>3</sup>当りの通水量は旧館で19 900 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>-GAC、新館で 21 200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>-GAC となり試運転期間も勘案すれば当初活性炭ライフ計算の基準とした23 000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>-GACは達成すると思われる。

## 5. 今後の課題

現在、異臭味除去を目的としてロクハ浄水場の高度浄水処理施設(活性炭吸着設備)が稼働しているが、将来において原水々質がより悪化した場合、オゾン処理の付加も考慮しなければならない。この点について当社も設計コンペの際にⅡ案として提案しているが、最適プロセスは原水々質の把握が必要である。よって今後の推移に注視したい。

維持管理面において活性炭吸着設備は再生が必ず伴うが、下部集水装置が有孔ブロックの場合、支持床として砂利を使用している。このため活性炭の抜出しに際して砂利の混入は再生炉への障害となるため注意を要する。

また支持床が不要のストレーナ方式の集水装置もあるが、作業の際に破損の恐れがある。この問題点を改善し、かつ優れた均等集配水の機能をもつ装置の開発が望まれているが、最近当社の技術提携先である米国の F. B レオポルド社が開発した新しい集水装置の情報が入ったので紹介する。この集水装置は写真3に示すように、従来からの優れた集配水装置である A/W 式レオポルドブロックの上に樹脂粒を焼結した多孔板を取付けたものであり、支持砂利層が不要であり活性炭吸着設備には適したものとなる。今後の新設される設備はもちろんのこと既存の設備にも適合できるよう早急に実用化をはかる予定である。

## むすび

以上、草津市ロクハ浄水場における高度浄水処理施設に関する紹介をしたが、本施設は'92年3月完成し、5月より琵琶湖の異臭味発生に備えて通水を開始し今年度は異臭味による住民被害も解消し、その目的を充分達成した。

厚生省も21世紀に向けた水道整備の長期目標の「ふれっしゅ水道10カ年計画」を策定し将来に向けた高水準の水道の構築を目指している。このような状況のなか当社の高度

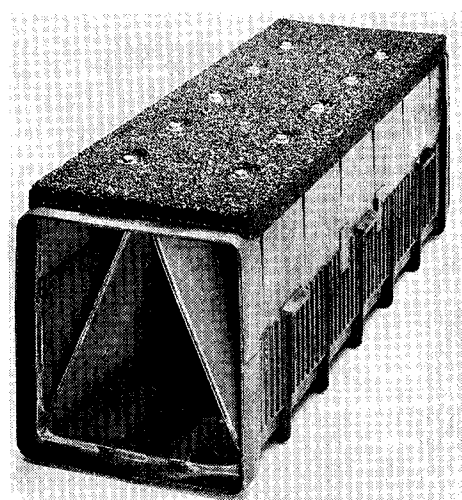


写真3 レオポルドIMS型集水装置  
Photo. 3 Leopold IMS™ cap underdrain

浄水処理技術を社会に役立てるとともに、「ふれっしゅ水道」に貢献できる技術開発をさらに進めていく考えである。

最後に、本施設の計画、建設、運転に当たり多大なるご指導、ご協力いただいた草津市水道部の方々に深く感謝の意を表します。

## 〔参考文献〕

- 1) 浦野紘平：“活性炭を用いた水処理技術の現状と課題”，工業用水，第232号，1978，p. 33
- 2) 丹保憲仁ら：“浄水の技術”，技報堂，(1985)，p. 308-309
- 3) 井出哲夫ら：“水処理工学”，技報堂，(1976)，p. 413
- 4) 日本水道協会：“高度浄水施設技術資料(活性炭処理施設)”(1988)，p. 9-10
- 5) 西尾弘伸：神鋼パンテック技報，Vol. 35 No. 3 (1991)，p. 38
- 6) 草津市：ロクハ浄水場原水水質状況(変更認可申請資料)，(1990)，p. 5
- 7) Herzing, D. R. et al: “Activated Carbon Adsorption of Odorous Compounds 2-Methylisoborneol and Geosmin.”, Jour. AWWA, 69(1977), p. 223
- 8) 藤原啓助ら：水道協会雑誌，第633号，(1987)，p.16-17