

# 上ヶ原浄水場再整備等事業（PFI）における粒状活性炭接触池のCFD解析

## CFD Analysis of a Granular Activated Carbon Contact Basin in the Uegahara Water Treatment Plant Redevelopment Project (PFI)

森藤昭博\*技術士(上下水道部門)・吉田忠広\*\*・藤本瑞生\*技術士(上下水道部門)・谷澤 謙\*  
Akihiro Morito・Tadahiro Yoshida・Mizuki Fujimoto・Yuzuru Tanizawa

2020年から進められている上ヶ原浄水場の再整備事業は、PFI方式により設計・建設および15年間の維持管理を行うものである。本事業では、カビ臭除去を主目的とした高度浄水処理が求められ、粒状活性炭接触池を含む処理フローの最適化を検討した。同水源の上流にある千苺浄水場の運用情報を活用し、原水水質に応じた粒状活性炭接触池のバイパス運用を導入する。また、敷地制約による構造上の課題に対し、CFD（数値流体力学）解析により流動の均等性を検証し、処理性能への影響が無いことを確認した。

The redevelopment of the Uegahara Water Treatment Plant, launched in 2020 under the PFI scheme, includes design, construction, and 15 years of operation and maintenance. The project involves advanced treatment technologies primarily targeting musty odor removal, optimized through a process that incorporates a granular activated carbon (GAC) contact basin. Using operational data from the upstream Sengari Plant, the GAC basin could be bypassed depending on raw water quality. CFD analysis was also conducted to address site-related structural constraints, confirming flow uniformity and unaffected treatment performance.

### Key Words :

民間資金等活用事業  
粒状活性炭接触池  
カビ臭  
CFD解析  
流動均等性

PFI: Private Finance Initiative  
Granular Activated Carbon (GAC) Contact Basin  
Musty odor  
CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis  
Flow Uniformity

## まえがき

上ヶ原浄水場は、神戸市の自己水源を担う浄水場として1917年に運用を開始した。施設の経年化に伴い、2020年から浄水場の再整備事業がPFI方式により進められている。本事業は、上ヶ原浄水場の設計・建設業務、その後15年間の維持管理業務を行うもので、当社（代表企業）を含む4社でJVを組織、共同出資しSPC（特別目的会社）を設立、市とSPCが事業契約を締結している。本稿は、上ヶ原浄水場再整備における処理システムの各種検討について報告するものである<sup>1),2)</sup>。

## 1. 処理システムの検討

### 1.1 水質条件について

本浄水場は千苺貯水池を水源としており、サービス対価の評価項目でもあるカビ臭が主な高度浄水処理対象である。カビ臭原因物質は主に微生物の活動によって生成し、代表的なものとして2-MIB（2-Methylisoborneol）やジェオスミンがある。要求水準では、想定する原水水質として2-MIBは30 ng/L、ジェオスミンは50 ng/L、これに対して要求される浄水水質は各々5 ng/L（管理目標値2 ng/L）である<sup>2)</sup>（表1）。

\*環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部 上水技術室  
\*\*環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部

表1 水質条件

水質項目	単位	過去10年の原水水質		要求する浄水水質	
		平均	想定する原水水質	要求水準値	管理目標値
ジェオスミン	ng/L	3	50	5	2
2-MIB	ng/L	1	30	5	2
アンモニア態窒素	mg/L	0.02	0.25 以下	—	—
鉄及びその化合物	mg/L	0.19	1.5 以下	0.03	0.03
マンガン及びその化合物	mg/L	0.091	0.8 以下	0.005	0.005
濁度	-	4.4	300 以下	0.1 以下	0.1 以下
pH	-	7.0	6.2~8.3	6.5~8.0	7.3~7.7

### 1.2 処理フローについて

本事業では、基本処理フローを凝集沈殿+ろ過とすることが要求水準で示されており、これに粒状活性炭接触池を組み込むことが条件となっている。粒状活性炭接触池の配置は提案によるようになっており、処理フローのどの位置に配置するか検討した。水源を同じくする千苺浄水場では、水頭差をいかした上向流で処理する粒状活性炭吸着槽が採用されている(図1)。処理フロー上、塩素処理前のため、生物活性炭機能もあると想定される。なお、4槽ある吸着槽のうち、2槽が自動洗浄(空気・気水洗浄)機能を備えている<sup>3)</sup>。

上ヶ原浄水場は、水源の千苺貯水池から離れてお

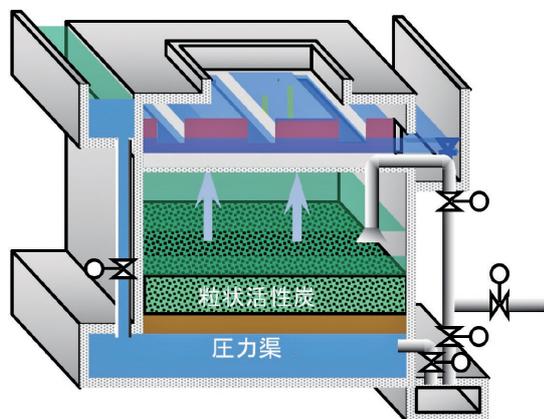


図1 上向流式粒状活性炭接触池

り、千苺浄水場から原水カビ臭濃度や変動等、原水水質の情報を入手する体制を構築する。その情報を基にカビ臭が低濃度または不検出時は、粒状活性炭接触池をバイパスして活性炭の寿命を確保する運用も可能とした。また、藻体内のカビ臭を、前塩素で藻体外へ放出させてから除去できるように、沈澱池の後に粒状活性炭接触池を配置した。その後段の急速ろ過池の前には、ピコプランクトン対策やろ過水濁度上昇抑制を目的として、再凝集槽を配置した(図2)。上ヶ原浄水場においては、西宮市条例による躯体等高さ制限があり、水頭差にあまり余裕がとれなかったため、必要水頭差が小さく、また目詰まり抑制と粒状活性炭接触池の接触効率を考慮し、千苺浄水場と同じ上向流式を採用した。

### 1.3 粒状活性炭接触池のバイパスについて

上ヶ原浄水場は、水源の千苺貯水池から15 km ほど下流にあり離れているため、千苺浄水場から原水カビ臭濃度やその変動等、原水水質の情報を適時入手し、その情報をもとに、カビ臭が低濃度、または不検出時は、粒状活性炭接触池をバイパスして活性炭の寿命を出来るだけ確保する運用を行う予定である。以下に現状検討しているバイパス運用方法について説明する。

上ヶ原浄水場の水源の千苺貯水池、また千苺浄水場原水のカビ臭は、年間の6割程度の期間で発生、

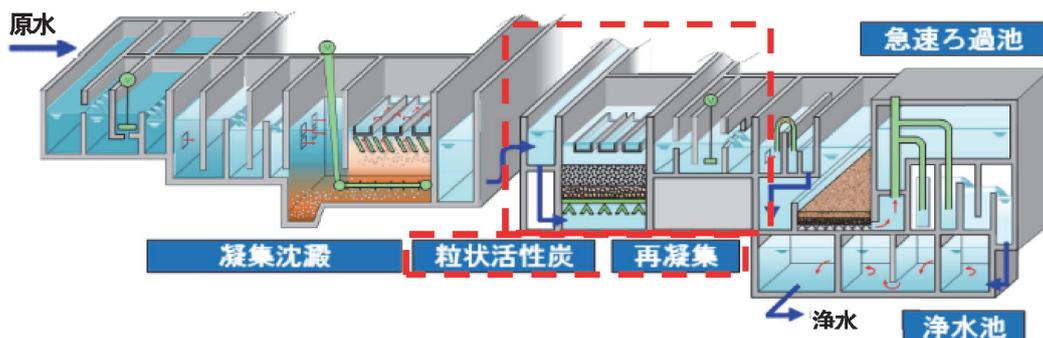


図2 上ヶ原浄水場フロー

濃度が高まる状況となっている<sup>2)</sup>(表2)。

粒状活性炭接触池の運用方法は、千苺浄水場からの水質情報を適時入手する体制を構築した上で、上ヶ原浄水場の原水水質予測を行い、粒状活性炭接触池の通水、バイパスを行う。千苺貯水池および千苺浄水場の原水カビ臭濃度が低いときは、粒状活性炭接触池をバイパスし、濃度の上昇傾向がみられると通水に切り替える。今回、沈澱池の後に粒状活性炭接触池を配置するため、前塩素で藻体内のカビ臭を外へ放出させ、粒状活性炭で確実に除去する<sup>2)</sup>。

暫定管理値については、過去の原水カビ臭濃度の発生状況を整理し、発生時濃度やその上昇速度を勘案して定めている(以下)。

＜暫定管理値＞

「千苺貯水池カビ臭濃度が10 ng/L を超える、また

は上ヶ原浄水場の原水カビ臭濃度が3 ng/L 以上で通水開始」 ※この管理値の実効性が確認できるまでは、粒状活性炭接触池は全池常時通水する。

ハード面では、粒状活性炭や砂利の支持装置として、ステンレス製の下部配水装置を採用している(図3)。本装置は、表流水などの上水原水を直接上向流で通水する生物接触ろ過設備(U-BCF<sup>®</sup>)に適用されている構造で、目詰まりしにくく、水、空気の均等性を長期間確保できる。

＜下部配水装置の特徴＞

- ・粒状活性炭、砂利を支持(強度3 t/m<sup>2</sup>以上)
- ・目詰りしにくい
- ・点検、清掃が容易(下面から実施)
- ・圧損が小さい(≒0.02 m)<sup>2)</sup>

表2 千苺浄水場 千苺浄水場のカビ臭発生状況

		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月		1月		2月		3月			
		2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos																
H25 2013	浄水場貯水池 原水	0	3	0	2	0	5	2	5	6	2	4	4	2	3	2	3	1	5	0	3	0	2	0	3		
	取水塔	0	2	0	3	2	11	5	39	5	1	8	5	3	3	2	3	1	4	0	2	0	2	0	2		
H26 2014	浄水場貯水池 原水	0	2	0	1	1	2	8	3	11	6	1	6	4	12	1	5	データ無し									
	取水塔	1	1	1	2	6	4	5	10	7	3	2	16	4	150	2	9										
H27 2015	浄水場貯水池 原水	0	1	0	1	0	9	1	2	2	2	2	0	3	1	3	9	3	26	0	1	0	2	0	0		
	取水塔	1	2	1	2	1	145	2	3	2	4	2	2	4	2	4	39	0	44	0	1	0	1	0	1		
H28 2016	浄水場貯水池 原水	0	2	0	1	0	3	1	3	4	3	7	42	1	2	2	2	2	2	2	3	0	3	0	0		
	取水塔	0	2	0	2	0	28	3	420	10	2	5	30	1	2	2	2	4	2	2	2	0	3	0	3		
H29 2017	浄水場貯水池 原水	0		0	1	0	27	3	6	7	2	6	2	4	3	0	2	0	3	0	3	0	3	0	3		
	取水塔	0	2	1	2	4	51	4	190	12	4	5	2	3	2	0	2	1	3	0	2	0	3	0	2		

※上表の数値は、当該月の最大濃度を示す。水色以外の期間が粒状活性炭接触池を通水する期間と想定。

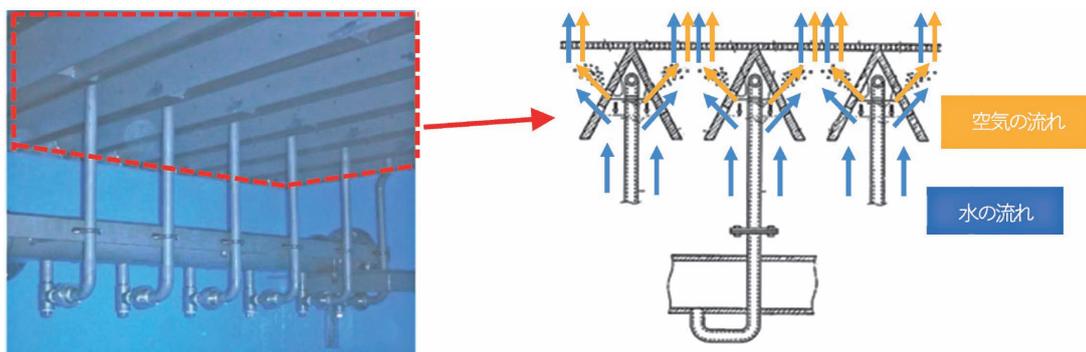


図3 下部配水装置

## 2. 流動解析

本浄水場は、敷地内の高地に再整備することで、送水にポンプ圧送が必要であった工程を、導水-浄水-送水の流れを自然流下方式に変更し、送水効率の向上をはかっている(図4)。この方式を実現す

るためには、限られた敷地内において、施設の適切な配置が求められる。狭小な敷地のため、全体配置において粒状活性炭接触池の躯体構造が長方形(W4.2 m × L12.9 m, 4池)となり(図5赤枠部)、池下部(圧力渠)への原水流入の均等性に懸念があ

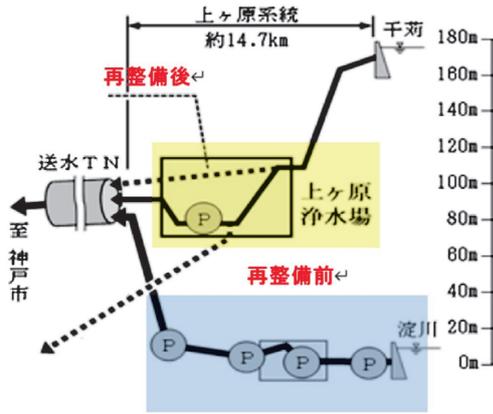


図4 再整備前後の差<sup>1)</sup>

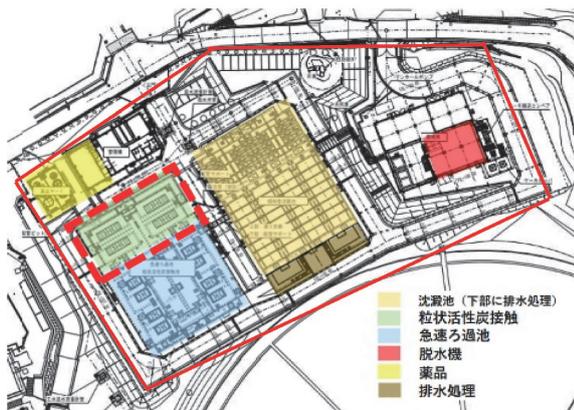


図5 粒状活性炭接触池(破線赤枠部)

った。そこで、流動解析 (CFD 解析) を行って影響を検証した。極力正確な流動を再現するため、流入部 (圧力渠) に設置する空洗配管, サポート類も障害物として設定した。解析条件は、通水や洗浄, また季節ごと通水量の変化により運転条件が変わるため、季節変化による水温の変動や水量変化による通水速度の変動を考慮し、次の条件を設定した。

- ・流速: 20 m/h および 13 m/h
- ・水温: 30℃ および 12℃

また、水温で変化する水の密度, 粘度を設定した。

## 2.1 各解析条件の結果

### <解析条件①>

「LV20 m/h, 水温12℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図6)

「パネル (下部配水装置) 直下～砂利～活性炭直下」(図7)

流速が早く、水温が低い条件として「LV20 m/h, 12℃」の解析結果を示す。左から池底～下部配水装置の直下 (パネル下650 mm～パネル下50 mm) となる (図6)。流入部が池の長辺に対して偏心的位置にあり、流入直後は流速の偏りが見受けられたが、上方向に流れるに従って偏りが減少し、均等性

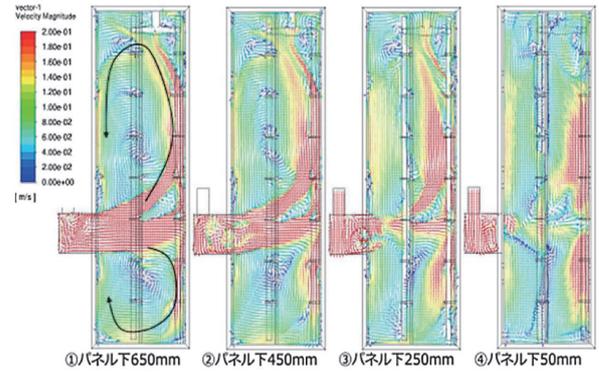


図6 LV20 m/h, 水温12℃  
池底付近～パネル (下部配水装置) 直下

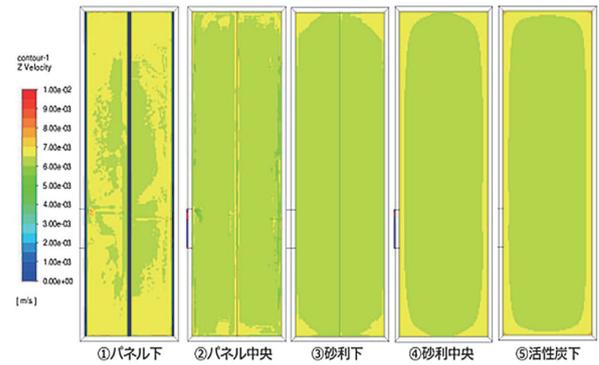


図7 LV20 m/h, 水温12℃  
パネル (下部配水装置) 直下～砂利～活性炭直下

への影響は小さいことが確認できた。

次に、同じ条件下で下部配水装置の直下から砂利層を経て、活性炭層の直下までの解析結果を示す (図7)。下部配水装置の直下では流れに偏りがあるが、上方向に流れる間に均等化しており、活性炭層での偏りについては、ほぼ無いと判断できる。

### <解析条件②>

「LV20 m/h, 水温30℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図8)

「LV20 m/h, 水温30℃, パネル (下部配水装置) 下～砂利～活性炭下」(図9)

池底～下部配水装置の直下 (図8) では、水の粘度, 密度が小さくなり、特に均等性を確保するために設置する下部配水装置での圧損が低下して、流れの偏りが大きくなると想定したが、結果として、12℃の結果と差は見られなかった。

下部配水装置の直下から活性炭層の直下 (図9) では、12℃に比べて、下部配水装置の直下で偏りが少し大きくなったが、活性炭層の直下に向けて、流れは均等化されている。

### <解析条件③>

「LV13 m/h, 水温30℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図10)

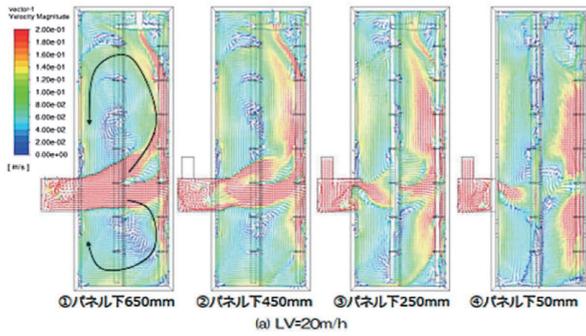


図8 LV20 m/h, 水温30℃  
池底付近～パネル(下部配水装置)直下

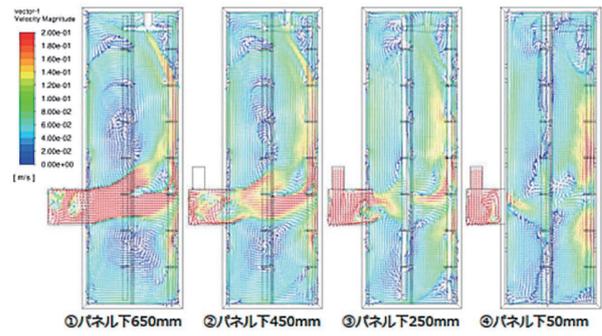


図10 LV13 m/h, 水温30℃  
池底付近～パネル(下部配水装置)直下

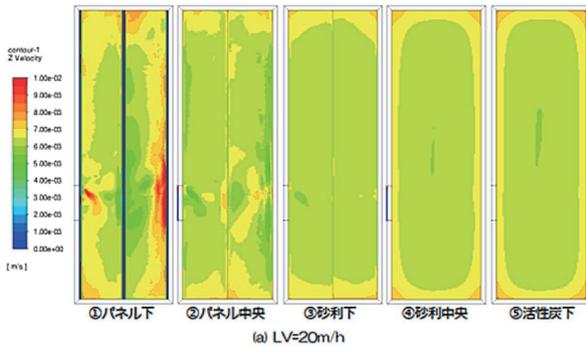


図9 LV20 m/h, 水温30℃  
パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下

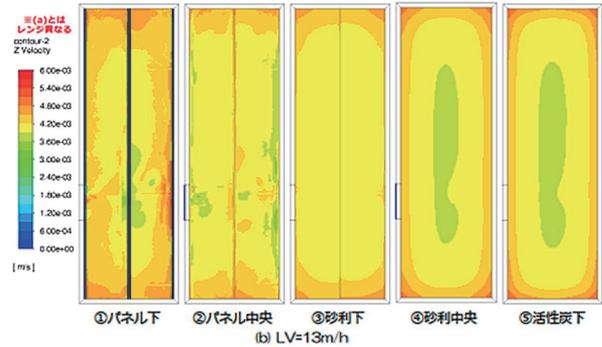


図11 LV13 m/h, 水温30℃  
パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下

「LV13 m/h, 水温30℃, パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下」(図11)

LV20 m/h (解析条件①②) に対し, 各部圧損が小さくなり, 均等性が悪化すると想定されるLV13 m/hの条件で解析した結果を示す。均等性が悪くなると想定される, 12℃より高い30℃でのみ, 流速を変えて実施した。池底～下部配水装置の直下(図10)では, 流速の低下で均等性の悪化が想定されたが, 下部配水装置の直下では, LV20 m/hより改善傾向となった。

下部配水装置の直下から活性炭層の直下(図11)では, LV20 m/hに比べて活性炭下での偏流が大きいが, 池の中心部と周辺の流速の差は数mm/sのため, 処理性能への影響は無いと判断できる<sup>2)</sup>。

## 2.2 まとめ

各技術課題と検討結果を以下にまとめる。

- ・カビ臭除去に最適な粒状活性炭接触池のフロー配置を検討した。
- ・敷地制約によって, 粒状活性炭接触池の躯体形状が長方形となり, 池の下部への原水流入の均等性に懸念があったが, 流動解析(CFD解析)を行い影響が無いことを確認した。

## 2.3 今後の取り組み

以下について, 2026年度から運転開始予定の上ヶ

原浄水場の試運転および維持管理運転で確認し, 安定操業に展開していく。

- ・粒状活性炭接触池を沈澱池の後に配置し, 再凝集槽の後に急速ろ過池を配置するフローの有効性
- ・長方形の躯体構造による粒状活性炭接触池の処理性への影響が無いこと
- ・カビ臭の発生状況に合わせて, 粒状活性炭接触池を通水・停止(バイパス)を行うための暫定管理値「浄水場原水3 ng/Lまたは貯水池10 ng/L超で通水」の実効性

## むすび

今回の検討を含め, 本事業においては, 要求水準に示される浄水水質を確保するため, また15カ年の維持管理運転で問題が生じないように, 各種データや情報を参考に工夫して設計した。今後建設, 試運転を行い, 維持管理が始まるが, 検討の成果が得られることを期待したい。

## [参考文献]

- 1) 佐藤 匠ほか: 2021年度全国会議(2-23)「上ヶ原浄水場の再整備(PFI事業)
- 2) 森藤 昭博ほか: 2024年度全国会議(4-25)「長方形粒状活性炭接触池における各種検討」
- 3) 八木 祐機ほか: 日本水道協会 関西地方支部 第59回研究発表会「洗浄装置付き粒状活性炭吸着槽における処理性について