

西部処理場における 混合濃縮運転に向けた事前調査

中央水環境センター施設課

1. 背景

令和2年11月より玉津処理場において、濃縮汚泥移送配管の閉塞対策として、従来は別々に濃縮していた生汚泥と余剰汚泥を、あらかじめ混合してから濃縮する運転（以下「混合濃縮」という）に変更した。変更により、配管閉塞の解消だけでなく、余剰汚泥への有機物吸着に伴う消化ガス発生量の増加や濃縮設備停止および臭気減少に伴う作業環境の改善・電力削減の効果が報告されており、現在のところ運転に悪影響は生じていない。

西部処理場においても耐用年数を迎えた生汚泥濃縮他設備の改築工事が予定されており、その中で混合濃縮を踏まえた設計が現在なされている。混合濃縮への変更に向けて、変更した場合の効果や水処理への影響について事前に調査する。

2. 汚泥混合による汚泥への有機物吸着等調査

西部処理場における各汚泥の引抜量・時間は表1のとおりである。時間帯による変動はあるものの玉津処理場と同様、おおむね生汚泥引抜量：余剰汚泥引抜量＝1：2であった。また、表2に改築工事の各工程における汚泥の混合状況について示す。

表 1. 西部処理場における現在の汚泥引抜状況（R2～4 平均値）

		引抜量 (m3/日)	濃縮機 供給量 (m3/日)	時刻（分）											60
				0	10	20	30	40	50						
生汚泥	1系	409	803	■					■						
	2系	268				■					■				
余剰汚泥	1系	1229	1743	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	2系	495		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

※黒塗部：引抜時間。1系は余剰汚泥引抜ピット液位制御のため時間不定

表 2. 改築工事各工程における各水処理系列の混合汚泥滞留時間（設計）

工程	1系	2系	北系
①既設運用	57分		—
②生汚泥濃縮機更新後			—
③北系運用開始	—	95分	208分
④1系水処理停止	—		

※③④は各系列の汚泥を別々に混合し濃縮する。最終的には各系列の汚泥を全ての貯留槽に送泥することが可能。

本項では汚泥混合による溶解性有機化合物の余剰汚泥への吸着の有無を確認した。加えて表2を踏まえて混合後の滞留時間を変えたときの有機物吸着量を調査した。また、玉津処理場の過去調査で、汚泥混合による余剰汚泥中のりん蓄積細菌によるりん酸の吐き出しが示されたため、これについても同様の条件で調査した。

2. 1 調査方法（ビーカー試験）

生汚泥・余剰汚泥・混合汚泥（生汚泥量1：余剰汚泥量2で混合後、30, 60, 100, 200分攪拌）をそれぞれ1μmガラス繊維ろ紙でろ過し、各汚泥とろ液について分析した。

2. 2 調査結果

表3に令和5年8月16日に実施した試験結果を示す。混合汚泥ろ液のCOD-Crの結果をみると、汚泥混合によりいずれの条件も計算値（生汚泥と余剰汚泥の加重平均（1：2））より低くなった。これは汚泥混合により生汚泥中の溶解性有機化合物が余剰汚泥に吸着されたためと考えられる。60分攪拌で最も吸着量が多くなり以降は減少した。また混合汚泥ろ液の全りんの結果をみると、いずれの条件も計算値より高くなった。これは汚泥混合により余剰汚泥中のりん蓄積細菌が生汚泥中の有機酸を利用してりん酸を吐き出したためと考えられる。攪拌時間が長くなると吐出し量は増えた。全窒素についても同様の挙動を示した。これは汚泥中のたんぱく質が分解したためと考えられる。

消化ガス発生量の増加および濃縮ろ液の返流負荷の低減を考慮すると、本調査における最適な攪拌時間は60分となる。

表3. 汚泥混合試験結果

	汚泥					ろ液		
	蒸発残	強熱残	COD-Cr	全窒素	全りん	COD-Cr	全窒素	全りん
	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/L	mg/L	mg/L
生汚泥	2.39	0.43	27000	870	180	1200	43	20
余剰汚泥	0.41	0.12	3700	230	120	17	2.2	0.5
混合汚泥①30分攪拌	—	—	—	—	—	300	18	14
混合汚泥②60分攪拌	—	—	—	—	—	230	15	12
混合汚泥③100分攪拌	—	—	—	—	—	300	22	20
混合汚泥④200分攪拌	—	—	—	—	—	320	25	24
混合汚泥（計算値）※	1.07	0.22	11467	443	140	411	16	7.0

※生および余剰汚泥の加重平均（1：2混合）

3. 汚泥混合による汚泥への有機物吸着等調査（攪拌有無による差）

前項の試験では、各汚泥を混合後規定時間攪拌した。経過時間によって結果に差がみられたが、これが「混合」時間によるものなのか「攪拌」によるものなのかを調査するため本項では以下試験を実施した。

3. 1 調査方法（ビーカー試験）

前項と同様に、生汚泥・余剰汚泥・混合汚泥（生汚泥量 1：余剰汚泥量 2 で混合後、30, 60, 100, 200 分攪拌）をそれぞれ 1 μ m ガラス繊維ろ紙でろ過し、各汚泥とろ液について分析した。加えて混合してから攪拌せずに同じ時間放置したものに対して同様の操作を行った。さらに生汚泥と余剰汚泥をそれぞれ単体で 200 分攪拌せずに放置したものについても同様の操作を行った。

3. 2 調査結果

表 4 に令和 5 年 10 月 10 日に実施した試験結果を示す。

表 4. 汚泥混合試験結果（攪拌有無）

試料	混合 時間 (分)	攪拌 有無	汚泥					ろ液							
			蒸発 残留物 (%)	強熱 残留物 (%)	COD-Cr (mg/kg)	全窒素 (mg/kg)	全りん (mg/kg)	BOD (mg/L)	COD-Cr (mg/L)	全窒素 (mg/L)	NH4-N (mg/L)	NO2-N (mg/L)	NO3-N (mg/L)	全りん (mg/L)	PO4-P (mg/L)
生汚泥	—	—	1.76	0.27	20000	620	130	860	900	47	22	<0.1	<0.1	20	14
生汚泥'	200	—						970	1100	48	22	<0.1	<0.1	23	15
余剰汚泥	—	—	0.44	0.14	4400	300	150	20	29	3.2	0.6	<0.1	2.1	1.9	1.8
余剰汚泥'	200	—						16	22	1.7	1.0	<0.1	0.3	7.9	6.8
混合汚泥①	30	○						270	200	19	4.6	<0.1	<0.1	16	13
混合汚泥②	60	○						270	240	19	7.8	<0.1	<0.1	23	19
混合汚泥③	100	○						280	190	22	8.1	<0.1	<0.1	29	24
混合汚泥④	200	○						350	330	25	11	<0.1	<0.1	39	31
混合汚泥 (計算値)※	—	○						300	319	18	8	<0.1	1	8	6
混合汚泥①'	30	×						260	190	17	6.9	<0.1	<0.1	17	13
混合汚泥②'	60	×						270	190	17	7.5	<0.1	<0.1	22	18
混合汚泥③'	100	×						290	250	18	7.7	<0.1	<0.1	30	23
混合汚泥④'	200	×						290	240	17	7.7	<0.1	<0.1	37	31
混合汚泥' (計算値)※	200	×						334	381	17	8.0	<0.1	0.2	12.9	9.5

※生および余剰汚泥の加重平均（1：2 混合）

生汚泥を 200 分間放置するとすぐにろ過したものと比べて COD-Cr が高くなった。これは有機化合物が分解したためと考えられる。窒素およびりんについてはほとんど変わらなかった。余剰汚泥では 200 分間放置するとすぐにろ過したものと比べて、COD-Cr と全窒素が低くなった。一方でりんは高くなった。全窒素に関しては、硝酸性窒素も低くなっていることから脱窒が進んだと考えられる。COD-Cr と全りんについては、有機化合物の分解と、有機酸を利用して汚泥からのりん吐き出しが起こったと推測される。放置しない各汚泥のろ液と、200 分間放置した各汚泥のろ液から算出した混合汚泥ろ液（計算値）を比較すると、汚泥を 200 分間放置することで、全体としてろ液中の溶解性有機化合物と全りんは高くなり、全窒素は変わらないことがわかる。

次に混合汚泥のろ液中の COD-Cr の結果をみると、攪拌した場合、概ね計算値より低くなったが、200 分攪拌すると計算値よりやや高くなった。生汚泥中の有機物と余剰汚泥中の微生物が接触することで加水分解・可溶化が起こり、ろ液に移行している可能性がある。一方で攪拌をしない場合、ろ液中の COD-Cr は 60 分までは変わらなかったが、以降高くなったものの 100 分で頭打ちになり、200 分経過しても変わらなかった。

ろ液中のりんの結果をみると、攪拌の有無による差はみられず、経過時間が長くなるほど余剰汚泥からのりんの吐き出しにより高くなった。

ろ液中の全窒素をみると攪拌しない場合は時間が経過しても変わらなかったが、攪拌した場合は 60 分以降徐々に高くなった。形態別窒素をみると、硝酸・亜硝酸態はいずれの条件でも検出されていないものの、アンモニア態に関して全窒素と同様の挙動を示した。これは「攪拌」を伴う時間経過により、余剰汚泥中の微生物がタンパク質等の有機体窒素をアンモニアへと分解したためと考えられる。

以上より攪拌有無による差がみられたが、実際には汚泥の均質化を考えると混合後の攪拌は必要と考える。消化ガス発生量の増加および濃縮ろ液による返流水負荷の低減を考慮すると、本調査における最適な攪拌時間は 30 分となる。

加えて、混合前の各汚泥単体を放置すると有機物の分解やりん吐き出しによりろ液中の濃度が高くなる可能性があることがわかった。混合前の各汚泥に関しては消化ガス発生量の増加や濃縮ろ液による返流水負荷を考慮するとできるだけ短い滞留時間が好ましい。

混合後の攪拌を行う前提で、2 および 3 の調査結果を踏まえると、最適な攪拌時間は 30 分、長くとも 60 分と考える。

4. 高分子凝集剤を用いた濃縮調査

高分子凝集剤を使用して、生・余剰および混合時間を変えて混合汚泥を濃縮した。さらに濃縮汚泥への有機物やろ液へのりん移行状況を調査した。

4. 1 調査方法（ビーカー試験）

生汚泥・余剰汚泥・混合汚泥（生汚泥量 1：余剰汚泥量 2 で混合後、30, 60, 100, 200

分攪拌) それぞれに高分子凝集剤を添加し、脱水キットを用いて自重ろ過した。得られた濃縮汚泥とろ液を分析した。

4. 2 調査結果

表5に令和5年9月27日に実施した試験結果を示す。混合汚泥に関しても現在使用している高分子凝集剤にて濃縮可能なことを確認することができた。SS回収率を比較すると60、200分攪拌で計算値よりやや悪化した。この理由としては前項で各汚泥単体の時間経過に伴う有機化合物の分解等の挙動を述べたが、汚泥の性状変化によるものと考えられる。実際に作業の都合上、60分攪拌の終了時刻を最も遅く設定しており、汚泥単体を長時間放置したことによる汚泥性状変化の影響を最もよく受けたと考えられる。ろ液のCOD-Crの結果をみると、いずれの条件でも計算値より低くなった。

表5. 汚泥混合濃縮試験結果 (COD-Cr)

		SS	蒸発残	強熱残	COD-Cr		汚泥 割合	ろ液 割合	回収率	COD-Cr 固形物量	高分子 添加率
					汚泥	ろ液					
				mg/L	%	%	mg/kg	mg/L	—	—	%
生汚泥		—	1.88	0.28	22,000	—	—	—	—	22	—
余剰汚泥		—	0.45	0.15	4,000	—	—	—	—	4.0	—
混合汚泥		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
混合汚泥（計算値）		—	0.93	0.20	10,000	—	—	—	—	10.0	—
生濃縮汚泥	汚泥	—	6.07	0.64	100,000	—	0.30	—	96.5	29.89	0.114
	ろ液	930	—	—	—	3,800	—	0.70	—	2.66	—
余剰濃縮汚泥	汚泥	—	4.00	0.76	62,000	—	0.11	—	99.0	6.90	0.278
	ろ液	50	—	—	—	66	—	0.89	—	0.06	—
混合濃縮汚泥① 30分攪拌	汚泥	—	5.11	0.65	110,000	—	0.18	—	97.6	19.46	0.207
	ろ液	270	—	—	—	570	—	0.82	—	0.47	—
混合濃縮汚泥② 60分攪拌	汚泥	—	5.03	0.63	85,000	—	0.18	—	96.7	15.15	0.207
	ろ液	370	—	—	—	890	—	0.82	—	0.73	—
混合濃縮汚泥③ 100分攪拌	汚泥	—	5.14	0.65	76,000	—	0.18	—	97.2	13.32	0.207
	ろ液	310	—	—	—	790	—	0.82	—	0.65	—
混合濃縮汚泥④ 200分攪拌	汚泥	—	4.87	0.61	85,000	—	0.18	—	96.4	15.59	0.207
	ろ液	410	—	—	—	970	—	0.82	—	0.79	—
混合濃縮汚泥 （計算値）※	汚泥	—	5.19	—	83,775	—	0.17	—	97.3	14.56	0.200
	ろ液	299	—	—	—	1,122	—	0.83	—	0.93	—

※分析結果より算出した汚泥およびろ液の割合から算出

表6に2. 3の試験で得られた各濃縮ろ液の形態別窒素・リンの結果を示す。2および3の汚泥混合試験と同様に、いずれの条件においても個別濃縮に比べて混合濃縮を行った方が濃縮ろ液中の全窒素および全リン濃度は高くなった。

表 6. 汚泥混合濃縮試験結果（濃縮ろ液中の窒素、りん）

	全窒素	NH4-N	NO2-N	NO3-N	全りん	PO4-P
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
生濃縮汚泥	140	27	<0.1	0.10	49	24
余剰濃縮汚泥	6.0	0.4	<0.1	1.2	3.3	2.5
混合濃縮汚泥① 30分攪拌	35	8.6	<0.1	<0.1	25	18
混合濃縮汚泥② 60分攪拌	46	10	<0.1	<0.1	33	23
混合濃縮汚泥③ 100分攪拌	43	12	<0.1	<0.1	37	27
混合濃縮汚泥④ 200分攪拌	52	13	<0.1	<0.1	48	34
混合濃縮汚泥 (計算値)	44	7.9	<0.1	0.9	16	8.6

5. 混合濃縮による水処理への影響

図2のとおり各ろ液は水処理へ返流することから混合濃縮への変更による水処理への影響を考察した。すでに混合濃縮を実施済みの玉津処理場の調査報告にもあるように、実際には混合濃縮により濃縮ろ液の各濃度は上がるものの、その分脱水ろ液の各濃度が下がることが想定される。しかし西部処理場ではまだ混合濃縮を実施していないため、混合濃縮ろ液については今回実施したビーカー試験結果を参照できるが、消化汚泥の脱水ろ液の水質は不明である。このため脱水ろ液の水質は現在の個別濃縮と同じとして、水処理への負荷を2.3の試験結果を用いて試算した。表7に試算結果を示す。

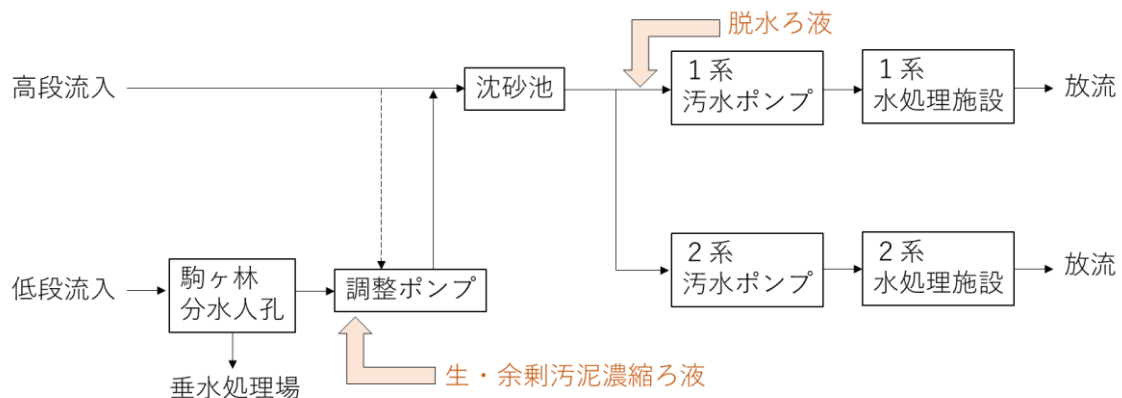


図2. 西部処理場における水処理フロー図

負荷量をみると濃縮ろ液より脱水ろ液の方が窒素・りんともに大きい。混合濃縮に変更した場合の各条件における1, 2系流入の濃度をみると、現状の個別濃縮と比べて窒素は同じかやや上がる程度であるが、りんは30分攪拌で1, 2系それぞれ約1.1, 0.5 mg/L、200分攪拌で約2.1, 1.3 mg/L上昇の見込みとなる。

ここで表8に各系列の放流水質を示す。基準遵守の観点から最も厳しい場合を想定すると、りんについて総量規制基準が濃度換算で4 mg/Lとなる。表8のとおり、特に1系の全りんが実績値最大で1.9 mg/Lであることを考えると、混合濃縮ろ液によるさらなる負荷増大の影響が懸念される。現状りんの大きな負荷源である脱水ろ液を1系のみに返流しており、もともと1系へりん負荷が偏っている。ただし将来的に返流先を調整P棟へ切り替える予定であり、これにより水処理全体に脱水ろ液が流入することになるため1系への負荷を和らげることができる。

以上より混合濃縮への変更に伴うりん負荷増大を試算したが、大きな負荷源である脱水ろ液の返流先切替が行われた後であれば、1系への負荷集中を和らげることができると考えられる。

表7. 混合濃縮による水処理への負荷量試算

		水量	全窒素		全りん	
		m3/日	mg/L	kg/日	mg/L	kg/日
実績値	濃縮ろ液	2,944	33	96	7.0	21
	脱水ろ液	1,351	353	476	80	109
	沈砂池流入下水	93,435	29	2728	3.4	314
計算値 (1系)	流入下水（個別濃縮）	67,620	36	2411	4.9	331
	流入下水（混合濃縮30分）		37	2514	6.0	405
	流入下水（混合濃縮60分）		38	2547	6.3	428
	流入下水（混合濃縮100分）		38	2538	6.5	440
	流入下水（混合濃縮200分）		38	2564	7.0	472
計算値 (2系)	流入下水（個別濃縮）	27,166	29	793	3.4	91
	流入下水（混合濃縮30分）		29	795	3.9	107
	流入下水（混合濃縮60分）		30	805	4.2	114
	流入下水（混合濃縮100分）		30	802	4.3	117
	流入下水（混合濃縮200分）		30	810	4.7	126

(計算条件)

実績値：R5年4～10月業務実績より算出

試算値：混合濃縮に変更したとして流入下水の水質・負荷量を算出

各ろ液水量：機器洗浄水を含む

濃縮ろ液濃度：生および余剰濃縮汚泥の加重平均

その他：図2の水処理フローに従い各系列負荷量・濃度を算出

表 8. 各系列における放流水質 (R 4 年度実績)

	全窒素 (mg/L)			全りん (mg/L)		
	平均	最大	総量規制	平均	最大	総量規制
1 系	14	18	40	0.95	1.9	4
2 系	8.0	11		0.19	0.37	

6. 消化ガス発生量の試算

2. 1 のビーカー試験で得られた結果から、消化ガス発生増加量の算出を試みた。

混合汚泥①30 分攪拌を例にすると、混合汚泥のろ液の COD-Cr は計算値と比べて 111mg/L 低く、この差が余剰汚泥に吸着された生汚泥の溶解性 COD-Cr と考えた。生汚泥と余剰汚泥を体積比 1 : 2 で混合した場合、濃度 0.41%の余剰汚泥固形物あたりの溶解性有機化合物吸着量は COD-Cr として

$$111(\text{mg/L}) \div (4.1(\text{g/L}) \times 2/3) \div 41(\text{mg/g}) \text{ となる。}$$

この結果から実施設での混合濃縮による消化ガス発生増加量を以下の通り推定した。西部処理場の令和 4 年度の余剰汚泥固形物量は 8.1t/日であったので、余剰汚泥に吸着される溶解性有機化合物量は

$$41(\text{mg/g}) \times 10^6(\text{g/t}) \times 8.1(\text{t/日}) \div 330 \times 10^6(\text{mg/日}) = 0.33(\text{t/日}) \text{ となる。}$$

ここで消化ガス中のメタンガス割合を 56.2% (令和 4 年度実績)、COD-Cr のメタンガス転換率を 0.35(L/g)*として、吸着された溶解性有機化合物は易分解であり、COD-Cr 量が全て消化ガスになると仮定すると、増加する消化ガス発生量は最大で

$$0.35(\text{L/g}) \times 10^{-3}(\text{Nm}^3/\text{L}) \times 10^6(\text{g/t}) \times 0.33(\text{t/日}) \div (56.2 \div 100) \div 205(\text{Nm}^3/\text{日})$$

と推定される。他の条件も同様にして算出した。結果は表 9 のとおりで、いずれも汚泥混合により消化ガス発生量が増加する見込みとなった。最大で 60 分攪拌すると約 335Nm³/日の消化ガスが増加する見込みとなり、これは R 4 年度の発生実績量 9380Nm³/日に対して約 3.6%の増加となる。

表 9. 消化ガスの発生増加量試算値

	汚泥			ろ液	消化ガス 発生増加量
	蒸発残	強熱残	COD-Cr	COD-Cr	
	%	%	mg/kg	mg/L	
生汚泥	2.39	0.43	27000	1200	—
余剰汚泥	0.41	0.12	3700	17	—
混合汚泥①30分攪拌	—	—	—	300	205
混合汚泥②60分攪拌	—	—	—	230	335
混合汚泥③100分攪拌	—	—	—	300	205
混合汚泥④200分攪拌	—	—	—	320	169
混合汚泥 (計算値) ※	1.07	0.22	11467	411	—

7. 臭気減少の効果

現在個別濃縮を実施している西部処理場と、混合濃縮の玉津処理場における濃縮施設の臭気を測定し、混合濃縮による臭気減少の効果を検証した。

7. 1 調査方法（現地調査）

測定場所：

（西部）生・余剰汚泥濃縮機 上部ダクト

（玉津）混合汚泥濃縮機 上部ダクト

測定項目：

硫化水素、硫化メチル、二硫化メチル、メチルメルカプタン、アンモニア
トリメチルアミン

7. 2 調査結果

令和5年11月27日に実施した。結果は表10のとおりである。処理場により汚泥性状等に差があるため定量的な比較はできないが、結果から混合濃縮を実施している玉津処理場の方が生汚泥由来の硫化水素の発生を抑制できている可能性が高いと考えられる。

表 10. 汚泥濃縮機における臭気分析結果（ppm）

濃縮方式	個別濃縮		混合濃縮
採取号機	初沈汚泥濃縮機1号 （西部処理場）	余剰汚泥濃縮機3号 （西部処理場）	混合汚泥濃縮機3号 （玉津処理場）
汚泥処理量(m ³ /h)	13	43	
硫化水素	22	0.002 未満	0.35
硫化メチル	0.030	0.001	0.024
二硫化メチル	0.0062	0.0009 未満	0.0059
メチルメルカプタン	0.73	0.0002 未満	0.14
アンモニア	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
トリメチルアミン	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満

8. まとめ

今回の調査により以下可能性が示唆された。

- ・汚泥混合試験結果より、汚泥混合後、攪拌時間60分まではおおむね余剰汚泥への有機化合物の吸着がみられたが、これを超えると汚泥中の有機化合物が分解しろ液に移行する。
- ・生および余剰汚泥単体を放置すると、汚泥中の有機物分解や汚泥からのりん吐き出しによりろ液中の濃度が高くなる。混合前の各汚泥に関して、消化ガス発生量の増加や濃縮ろ液による返流水負荷を考慮するとできるだけ短い滞留時間とすることが好ましい。
- ・混合濃縮による水処理への影響を考察した。窒素に関しては同じか微増する程度であった

が、りんに関しては増加する見込みとなった。もともと高負荷源である脱水ろ液が1系のみに返流していることもあり、特に1系への負荷が大きくなった。濃度に換算すると30分攪拌で約1.1 mg/L、200分攪拌で約2.1 mg/L上昇の見込みとなる。ただし、将来的に脱水ろ液の返流を水処理全体に変更する予定であるため、変更されれば1系への負荷集中を和らげることができる。また、実際は混合濃縮ろ液に移行するりんが増えた分、脱水ろ液中のりんが減り、返流水負荷も想定より減る見込みである。

- ・汚泥混合により最大で60分攪拌の場合、約335 Nm³/日(3.6%)の消化ガス発生量増加を見込むことができる。
- ・汚泥濃縮機の臭気を分析したところ、個別濃縮を実施している西部処理場に比べて混合濃縮を実施している玉津処理場の方が硫化水素の濃度が低くなった。混合濃縮により硫化水素の発生を抑制できている可能性が高い。

参考文献

- ・「初沈汚泥・余剰汚泥混合濃縮による消化ガス発生量の増量」(下水道協会誌 2023. 4 Vol. 60 No. 726)
- ・「混合濃縮運転による影響調査」(令和3年度 処理品質部会報告書(神戸市))