

トピックス

加圧浮上分離への GALFシステムの適用について

堀 登紀男*¹⁾ 柏 雅一*²⁾ 平沢 公雄*³⁾ 町谷 勝幸*⁴⁾

1. はじめに

今日の社会では、限りある貴重な水を産業用水あるいは私たちの生活用水として有効に活用し、その使用後においては、適切な処理を施し排水としての放流または再利用を行うなど、地球環境の保全を目的に各種の分野で多くの人々の努力が払われている。

当社では、かねて環境制御に関わる多くの技術開発を進めてきているが、GALF(Gas Liquid Foam)システムは、微細気泡の生成をはじめ、溶存酸素の向上、気液の反応あるいはオゾン利用技術など、水環境保全システムとして、独自の気液混相技術の用途を広く各方面に提案している。

このほど、西日本旅客鉄道株式会社福知山施設区殿と共同で、排水処理・加圧浮上分離における新しい気泡水(加圧水)製造技術の実証を行い、本稼働の状況(図1)を達成したので、そのシステムの概要と今後の展開について簡単に紹介する。

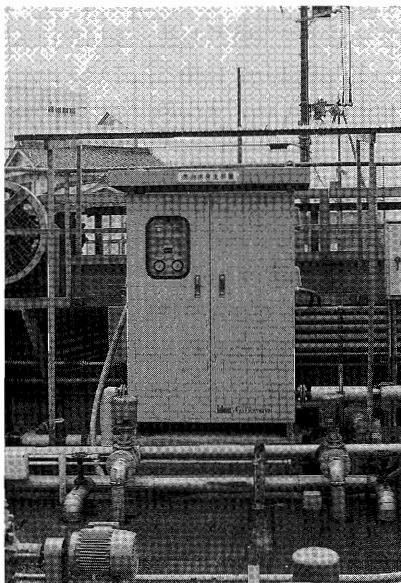


図1 気泡水製造装置：FZ1A-606G116

2. 気泡水製造原理

2.1 加圧タンクによる加圧水製造(従来的一般的手法)

空気の水への溶解量が圧力に比例することは良く知られている事実である¹⁾。大気圧以上の加圧によって空気を大量に溶かし込んだ後、一気に大気圧下に解放するとその水は過飽和状態になり、溶け込んでいた空気は気泡となって析出する。この析出気泡は合泡しにくいという性質を持つため、煙のように白濁した微細気泡を含む水を得ることができる(給湯器からのお湯が白濁しているという現象を目撃することが多いが、まさにその状態である)。一般的には加圧タンクを用いて行われるため、それによって得られる水は「加圧水」と呼ばれている²⁾。

加圧水製造のモデル図を図2に示す。GおよびLは、それぞれ空気および水の流れを指し、ここで、

- P_1 : タンク内加圧
- P_2 : ポンプ圧送圧
- P_3 : コンプレッサ圧
- Q_1 : 加圧水量
- Q_2 : 水量
- Q_3 : 空気量

である。

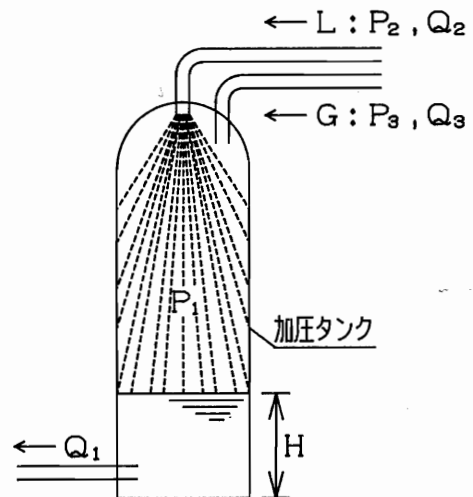


図2 加圧水製造モデル図

* 1) 研究部
* 2) 研究部
* 3) 研究部
* 4) 研究部

これはコンプレッサで加圧されたタンク内に水を注入して加圧溶解する方式であるが、噴霧を行うことで気液接触面積を増やし溶解効率をあげる工夫がなされている。この場合、水面位置Hが重要なファクタとなる。当然、水面位置を低くして水面上の空間が多くとれば溶解効率は高くなるわけであるが、あまり水面位置が低くなると吐出口へ空気が流出してしまい、加圧水製造の機能をたさなくなる。したがって、水面が適正位置で保持されるための制御が必要であり、

$$P_1 < P_2 \quad (\text{タンク中に水を注入するための条件})$$

$$P_1 = P_3$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (Q_3 \text{ は水中に溶解してタンク外に吐出されることより } Q_1, Q_2 \text{ に比べて少量であるため等号と見なせる})$$

の条件が満たされなければならない。この等号条件を保持するためには、ポンプ、コンプレッサおよびバルブ等の精密な制御が必要である。また、等号条件は微妙な状態変化でもバランスの崩れが生じてしまうので、水面位置を安定に保持するためには大変な手間と労力が必要である。

2.2 GALFによる気泡水製造（弊社独自の手法）

GALF気泡水製造装置も加圧溶解を利用したものであり、そのモデル図を図3に示す。GおよびLは、それぞれ空気および水の流れを指し、

P_4 : ミキシングボックス内加圧

P_5 : 吸引器内静圧

P_6 : ポンプ圧送圧

P_7 : 大気圧

Q_4 : 気泡水量

Q_5 : 余剰空気量

Q_6 : ポンプ水量

Q_7 : 吸引空気量

である。

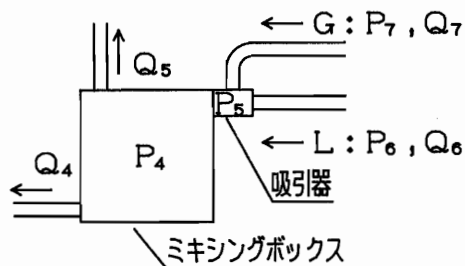


図3 気泡水製造モデル図

ポンプから圧送されてくる水流に対し、吸引器はその管路を狭めて流速を上げることよりポンプ圧送圧 P_6 の大部分を動圧に変換する⁽⁴⁾。その結果、吸引器内静圧 P_5

を大気圧 P_7 より低くすることができるため、空気は自動的に吸引される⁽⁴⁾。

したがって、

$$P_4 < P_6 \quad (\text{タンク中に水を注入するための条件})$$

$$P_5 < P_7 \quad (\text{空気が自吸される条件})$$

という不等号さえ成立すればよいため、精密な制御や微妙なバランスの保持を必要としない。また、圧送されてきた水と吸引された空気は、気液混相状態となってミキシングボックス内へ送り込まれ、その流れの中で加圧溶解が行われるため、従来の加圧水製造のような水面制御の概念も必要とはしない。さらに、加圧溶解で溶解しきれなかった余剰空気は、ミキシングボックス内で自動的に分離されごく少量の水を伴いながら Q_5 として吐出されるため、

$$Q_4 + Q_5 = Q_6 + Q_7$$

でありながら、複雑な制御を伴わずとも Q_4 において水中に溶解した空気だけを安定に吐出し、数〜数十 μm という微細径の析出気泡群を極めて容易に供給することができる。

上記理由によりGALFは、

- ① 大量の微細気泡を安定かつ連続的に製造することができる。
- ② コンプレッサ不要であるため、ポンプとの調整などのコントロールの必要性はなく、いわゆるワンプッシュボタンでの運転・停止が可能であるほど操作が簡単。
- ③ 運転開始での立ち上がりが速く、十数秒後には気泡の供給を行うことができる。

という極めてユニークな特長を持っている。なお、我々は「加圧水」との差別化の意味で、GALFによって得られる水を「気泡水」と呼んでいる。

3. 浮上分離とGALF

3.1 排水処理の分類

排水処理において、処理対象物はおおまかに、浮遊物質、コロイド物質、溶存物質に大別されるが、それらを処理するための手法としては、物理、化学、及び生物的方法があげられる。表1にその関係を示す。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

3.2 凝集加圧浮上法

水より密度の大きいものに気泡を付着させることにより、見かけの密度を小さくして浮上させる場合が浮上分離である。浮上目的物に気泡を付着させるためには、微細かつ大量の気泡が必要であり、一般的には加圧溶解による微細気泡が利用される⁽⁸⁾。このため本方法は加圧浮上法と呼ばれているが、この加圧浮上法だけではコロイド状懸濁物質の分離はできないため、薬剤等により微小

表1 排水処理の分類

	主な処理対象	具体的な処理法	備考
物理的	浮遊物質	沈澱分離 浮上分離	比重差による分離 コロイドの場合は凝集化が必要
		遠心分離	凝集ろ過, 急緩速ろ過....
	コロイド物質	膜透過	逆浸透析, 電気透析....
		活性炭吸着	
化学的	溶存物質	中和 pH調整	
		酸化分解	塩素, オゾン, UV....
		イオン交換	重金属の回収....
生物的	溶存物質	活性汚泥 曝気酸化	生物体を浮遊状態に置くもの
		嫌気性消化	
		散水ろ床 回転板接触 間欠砂ろ過	生物体を固定状態に置くもの

粒子を気泡が付着し易い大きさにする「凝集処理」が必要になる場合が多い。なお同じ重力式分離法である凝集沈澱法との一般的な優劣の比較は以下のとおりである²⁾。

- (1) 浮上速度は沈降速度より大きい。
- (2) 所要動力は加圧浮上法の方が大きい。
- (3) 処理水の濁度は凝集沈澱法の方が低い。
- (4) 分離汚泥の水分は加圧浮上法の方が低い。
- (5) 原水温度の変動に対しては加圧浮上法の方が安定している。

3.3 凝集剤

従来の水処理に用いられている凝集剤は、その組成により「(高分子) 無機凝集剤」及び「(高分子) (有機) 凝集剤」に大別される。

水中の懸濁粒子(コロイド)の表面は(-)に帯電して互いに反発しあっているため、PAC(ポリ塩化アルミニウム)に代表される「無機凝集剤」を加え表面電荷を中和することにより懸濁粒子を凝集させることができる²⁾。この懸濁粒子が凝集して粒子状のかたまりになったものをフロックと呼ぶ(図4)。なおPACは水道の浄水処理にも用いられており²⁾、水処理程度の使用量であれば生物に対して悪影響は与えない、と一般的に言われている。また無機凝集剤だけでは凝集粒子が細かすぎて沈澱・浮上処理には不十分である場合(マイクロフロック)は、架橋吸着作用を持つ「高分子凝集剤」の使用によりフロックの成長を促す必要が生じる²⁾(図5)。

3.4 GALFの効用

浮上分離においては、気泡を十分にフロックへ付着させる、という点が重要視される。そして、その手段としては、

- ① 微細径の気泡を大量かつ安定に供給する。
- ② フロックを大きくする。

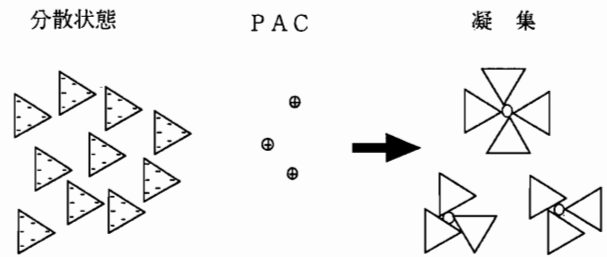


図4 無機凝集剤, 凝集イメージ

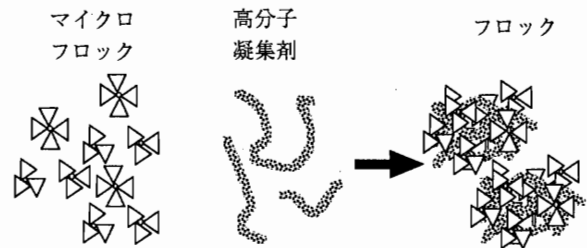


図5 高分子凝集剤, 凝集イメージ

の2点があげられ、①の内容に対してGALFの微細気泡が有効である。

実験例として、3種類の排水におけるビーカテストの結果を表2に示す。この表において「処理前」とはサンプル排水そのものであり、「処理後」とはサンプル排水に対し凝集処理およびGALFの気泡水による浮上分離処理を行い浄化した結果である。なお、凝集に使用した凝集剤および浮上分離に使用した気泡水の量は表中の「処理内容」の通りである。

表2 サンプル実験

件名	分析項目	単位	処理前	処理後	処理内容(添加量)
含油排水 ※ ¹⁾ 抽出物質	BOD	mg/ℓ	2000	1300	PAC:1200 _{ppm} 気泡水:25%
	COD	mg/ℓ	1400	1000	
	SS	mg/ℓ	130	3	
	抽出物質	mg/ℓ	470	<1	
食品製造 排水	pH(at22°C)		6.4	6.2	PAC:400 _{ppm} 高分子凝集剤:100 _{ppm} 気泡水:40%
	SS	mg/ℓ	850	14	
	抽出物質	mg/ℓ	250	<1	
一般排水 米のとき汁	BOD	mg/ℓ	560	77	PAC:1000 _{ppm} 20%NaOH水:500 _{ppm} 気泡水:20%
	COD	mg/ℓ	410	70	
	SS	mg/ℓ	450	10	
	濁度	度	850	4	

この結果が示すように、不溶物質の指標である「SS(懸濁粒子濃度)」や「ヘキサン抽出物質(油分濃度)」に関しては格段の向上がみられ、これらが処理目標項目であれば「凝集加圧浮上」の単発処理で目的を達成することが可能である。しかし、BODなど溶解性物質に関

しては生成フロクの吸着により多少の減少はみられるものの¹⁰⁾、不溶物質ほどの効果はあがっていない。ただし、後段に生物処理がある場合などは、不溶物質を分離することで生物処理への負荷が大きく削減されることから、微生物処理の前処理として考えても大きな効果があるものと判断できる。

4. 洗車排水の浄化処理における実機実験

4.1 背景

西日本旅客鉄道株式会社（JR西日本）福知山施設区殿に設備されていた排水処理装置は、車両洗浄水中に含まれる油分およびその他懸濁粒子の分離除去を目的とした凝集加圧浮上方式である。その微細気泡は加圧タンクによって供給されるものであったため、気泡の発生状態にばらつきが生じること、ポンプとコンプレッサのバランスの調整に手間や熟練が必要であること、さらには未処理水の放出というアクシデントの危険性を含んでいることなど、種々の改良検討が行われていた。これらの改良と動力費等のコストダウンを行うためGALFの採用を検討、既設装置に対する優位性の検証を目的とする実験を、JR西日本殿と弊社との共同で行った。

4.2 装置

4.2.1 既設装置

福知山施設区既設の排水処理システムの概略フロー図を図6に示す。前段の凝集槽で凝集処理が行われた後、加圧水とともに浮上槽へ流入してフロクは浮上分離される。浮上したフロクは水槽上部の掻き取り装置によって槽外へ掻き出され、脱水後焼却処理される。浮上分離によって浄化された水はそのまま河川へ放流されるが、その一部は加圧水の原料水として加圧水製造装置に返送される。この設備の設定値および処理排水の水質に関するデータを表3、4に示す。

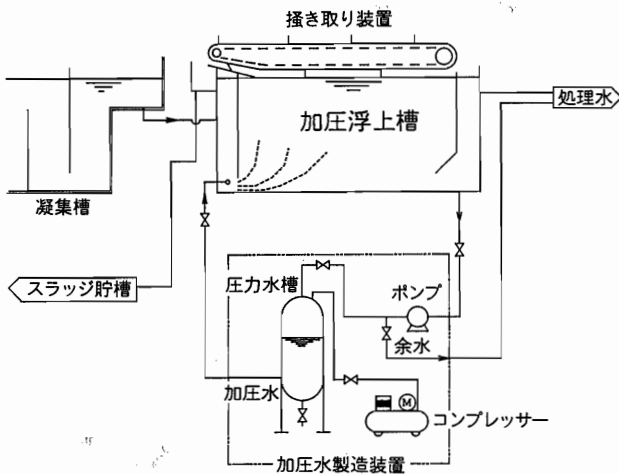


図6 既設装置、フロー図

表3 加圧水製造装置、設定値

浮上槽	水槽内のり	1800W * 1300H * 7000L
	排水流入量	30 m ³ /h
加圧水製造装置	加圧水吐出流量	6 m ³ /h
	加圧タンク圧力	4 Kg _f /cm ² G
	ポンプ動力	7.5KW
	コンプレッサ動力	0.4KW

表4 処理排水、水質データ

項目	単位	排水水質	排出基準値
BOD	mg/ℓ	150	160 (日間平均;120)
COD	mg/ℓ	50	160 (日間平均;120)
SS	mg/ℓ	120	200 (日間平均;150)
N-ヘキサン	mg/ℓ	50	5

4.2.2 GALF適用

弊社独自のGALFを適用したシステムの概略フロー図を図7に示す。これは図6における「加圧水製造装置」の代わりに「気泡水製造装置」を設置したものである。気泡水製造装置の設定値を表5に示す。

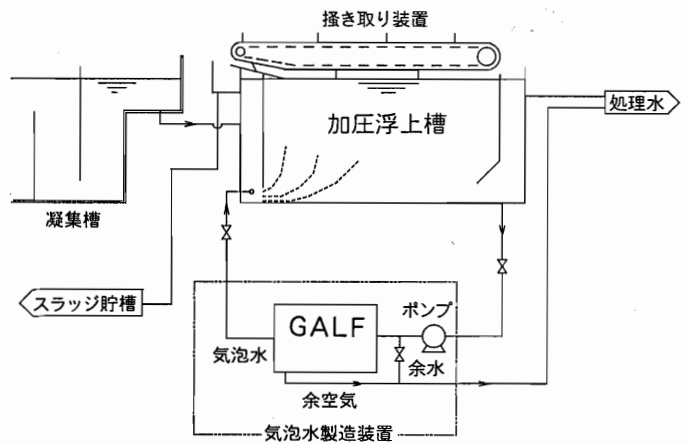


図7 GALF適用、フロー図

表5 気泡水製造装置、設定値

気泡水製造装置	気泡水吐出流量	6 m ³ /h
	溶解圧	3Kg _f /cm ² G
	ポンプ動力	4.0KW
	コンプレッサ動力	無し

4.3 実験

浮上分離の効率は、フロクへの気泡の付着率によって大きく左右されるため、「微細気泡供給」と「フロク生成」の兼ね合いによって決定される(3.4 GALFの効用、参照)。既設装置による加圧水供給の場合およ

びGALFによる気泡水供給の場合の差異の検証を行った結果、以下のとおりの効率向上が見られた。

4.3.1 PAC添加量の削減

GALF適用浮上分離装置において、PACの添加量を既設の浮上分離装置での設定値140ppmから任意の間隔で50ppmまでの値を設定して処理を行い、水質などの変化を調査したところ、表6の結果が得られた。これより、GALF気泡水製造装置に変更することで、PACの添加量を88ppmに低減しても充分排水処理は可能であることが判明した。

表6 PAC添加量低減実験

PAC濃度 (ppm)	処理済・水質						浮上状態	判定
	pH	SS	N-化合物	COD	BOD	透明度		
144	6.5	1	0.2	3.1	1.4	200	良	◎
120	6.5	3	0.3	2.8	1.3	200	良	◎
100	6.6	3	0.2	2.8	1.0	200	良	◎
88	6.6	1	0.6	2.5	0.7	200	良	◎
77	6.6	4	0.7	2.8	1.2	150	竹良	△
50	6.8	5	0.9	2.7	0.9	90	竹良	△

4.3.2 浮上槽の縮小

既設の浮上槽を、仕切板で上流から流れ方向に、2.4、3.9および5.4mの位置にそれぞれ設置(図8)し、その分離状況を調査したところ、表7の結果が得られた。この結果、既設の浮上槽の断面(1800W×1300H)において長さが3.4m以上あれば、浮上槽としての機能を充分に果たすことが判明した。

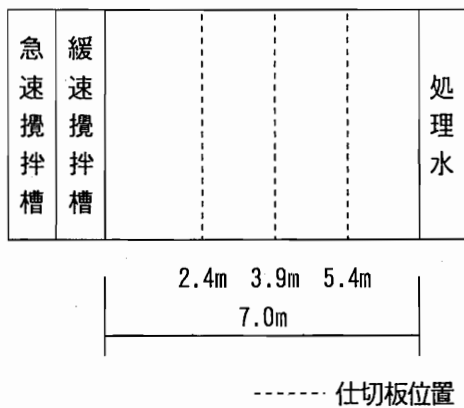


図8 浮上槽縮小実験、浮上槽上面図

表7 浮上槽縮小実験結果

	仕切板の設置距離		
	2.4m	3.9m	5.4m
透明度	45	120	198
フロックの最終浮上距離	2.4m以上	3.4m	←
判定	×	◎	◎

4.3.3 考察

浮上選鉱のように浮上させる粒子の表面が疎水性である場合、粒子自ら気泡に付着するため粒子径に比べて気泡径が大きい(気泡の表面積が広い)方が付着率は高くなる¹⁰⁾。しかし排水の浮上分離においては、水中に分散していたコロイド粒子を凝集させてフロックとするため、その表面は親水性を示す¹¹⁾。すなわち、フロックの大きさに比べて気泡が小さいほど気泡の付着率は高くなる¹⁰⁾。図9、および図10のイメージ図に示されるように、気泡はフロックの大きさに比べて微細であるほどフロックに捕らえられ易い。また、気泡径が大きい場合、その浮上速度が速いことによる付着率の低下という悪影響も加わる。

以上のことより、フロック径と気泡径の相対的な差が大きいほどフロックの分離効率は良くなる。つまり、良好な凝集状態とはいえない比較的微小なフロックでも、供給される気泡の径が微細であるほど、分離されやすいことが「4.3.1 PAC添加量の削減」の実験で裏付けられたものと判断される。

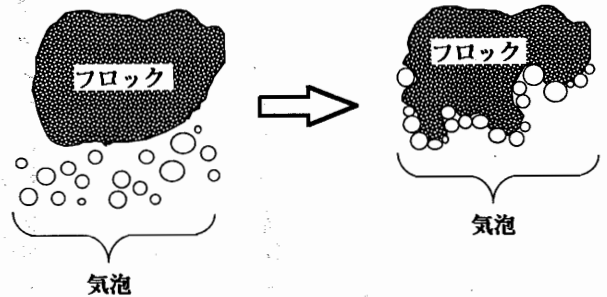


図9 微細気泡とフロック、イメージ図

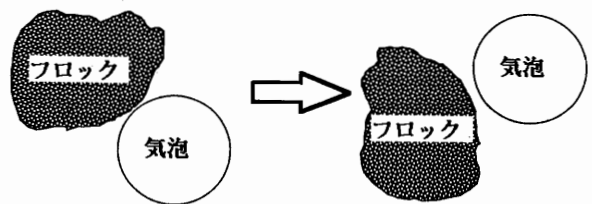


図10 大径気泡とフロック、イメージ図

横流式の浮上分離におけるフロックの移動ベクトルは、図11のとおり横方向の流れベクトルと縦方向の浮力ベクトルにより合成される。これに微細径の気泡を供給してやれば気泡が付着し易いため、大量の気泡が付着し浮力ベクトルが増す。その結果、合成ベクトルの方向は垂直方向に近づきその速度も大きくなるため、流れ方向に対して短い距離で浮上が完了するのである。「4.3.2 浮上槽の縮小」の実験結果によれば、GALF設置により浮上完了距離が既設装置の約半分に短縮されたので、その浮上速度は約2倍になったものと推定される。

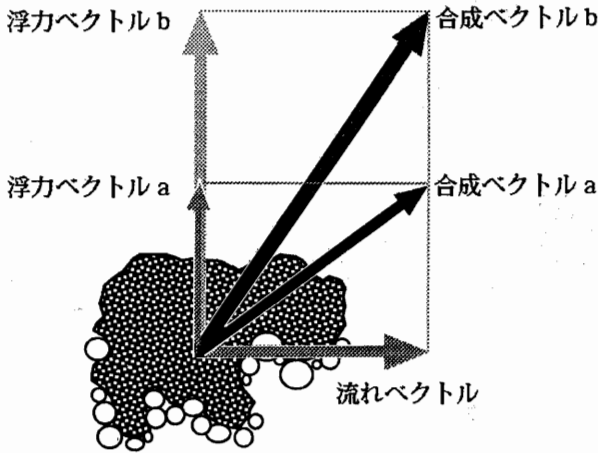


図11 フロックの浮上ベクトル

4.3.4 運転維持に関して

既設の加圧水製造装置は、「4.1 背景」において説明したとおり、ポンプとコンプレッサのバランスの調整に手間や熟練が必要であった。また、一時的に装置を停止して再起動する場合、煩雑な調整を加えながら安定化するまで20分以上の時間が必要であるため、24時間の連続運転を余儀なくされるという欠点があった。しかしGALF気泡水製造装置を設置してからは、

- ① 煩雑な調整を必要としないためオペレータの負担（調整、監視、人員数）が極めて軽減された。
- ② 始動後十数秒後には安定状態となり気泡の供給が行われるため24時間連続運転の必要がなくなり、1/2~1/3の稼動時間で処理が可能になった。

という操作性の向上がみられた。この操作性の向上は、「2.2 GALFによる気泡水製造」で説明したとおり、

- ① 初期設定の決定後は煩雑な調整を必要としない。
- ② 始動時の立ち上がりが速く、かつ安定した微細気泡の供給を行うことができる。

というGALFの特長によるものであり、数値化しにくいデータではあるが如実にGALFの効能を表している。

また平成6年1月の設置、本稼働いらい、本機はトラブルもなく順調に性能を発揮しているほか、現場関係者の方々からも、保守、保全、監視等の負荷が極めて軽減されたと好評をいただいている。

4.3.5 コストメリット

コストメリットに関するデータをまとめると、表8のとおりになる。

このデータをもとに、GALFのコストメリットを計算した結果、既設の加圧水製造装置からGALF気泡水製造装置に変更することで、年間約73%の経費削減が可能、と算出された（図12）。

表8 コストメリットに関する変更点

項目	既存装置	GALF
動力	7.9kw	4.0kw
PAC添加量	140ppm	88ppm
稼動時間	24h	12h

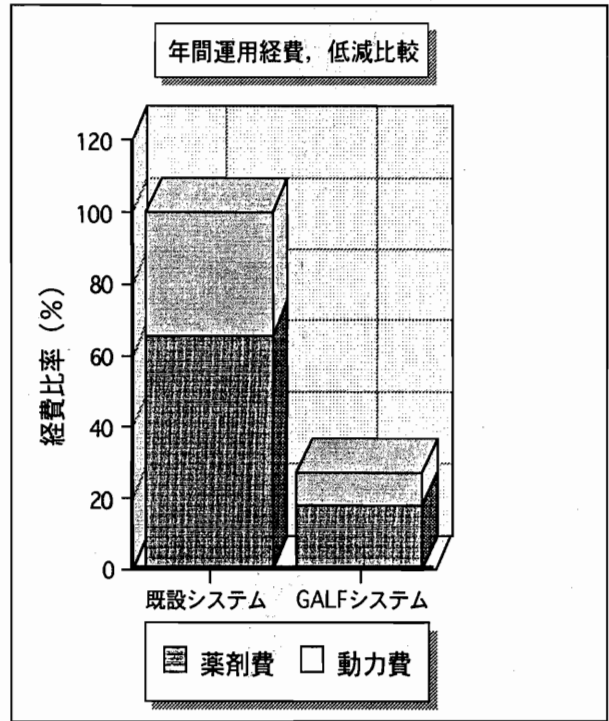


図12 排水処理システムの年間経費比較

5. おわりに

排水処理における加圧浮上分離は各方面で利用されている方式であるが、従来の加圧水の製造方式では十分な能力が得られていなかった。今回提案のGALFシステムは、これらの加圧水製造に対し、新しい提案を提示できたものと確信している。

GALFシステムは、液体中への気体吸引および加圧溶解、気液分離、解放減圧を、連続した管路の流れの中で行うものである。これは流体力学に裏付けられた弊社独自の方式であり、コンプレッサおよび圧力タンクが不要であるという構造のシンプルさのほか、微細気泡生成の性能、装置の取扱いなど実運転を通じ、関係各位から極めて高い評価ならびに絶大な信頼をいただくことができた。また排水処理のみならず浮上分離全般に渡って応用できる技術であり、さらには湖沼浄化、オゾン水処理、水耕栽培、水産養殖、物の洗浄など、各方面で幅広く利

用いただけるよう、その用途を開発、研究中である。

最後に、実証実験にあたり西日本旅客鉄道株式会社福知山施設区殿関係各位には、ご指導ならびに絶大なご協力を賜りましたこと、心より深く感謝申し上げます。また、ご協力いただきました弊社関係各位にも心からの感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) 宮原敏朗, 加圧下での酸素の水への溶解, 水処理技術, Vol.32 No.4 p.9-15, 1991年
- (2) 通商産業省立地公害局監修, 三訂・公害防止の技術と法規(水質編), (社)産業公害防止協会, 1988年
- (3) 池森亀鶴, 改訂水力学, (株)コロナ社, 1987年
- (4) 町谷勝幸, 他, 気泡水の生成と利用, IDEC REVIEW, 1993年, p.8-16
- (5) 松谷守康, 排水の公害対策, 理工学社, 1993年
- (6) 辻幸男, 排水処理基礎講座(凝集分離-5), PPM, 1994年1月, p.84-92
- (7) 丹保憲仁, 他, 浄水の技術, 技報堂出版(株), 1985年
- (8) 日本工業規格, 水道用ポリ塩化アルミニウム, JIS K 1475-1978, 1989年 確認
- (9) 辻幸男, 排水処理基礎講座(凝集分離-6), PPM, 1994年2月, p.72-81
- (10) 辻幸男, 排水処理基礎講座(凝集分離-7), PPM, 1994年3月, p.65-73
- (11) 臼井進之助, 浮遊選鉱の話, バウンダリー, 1989年6月, p.33-39
- (12) 楠田哲也, 他, フロス内気泡の形状からみた浮力の有効性, 下水道協会誌論文集, Vol.28, No.334, 1991年