

TEXEL 技報

Vol.9 2018.06

 セイコー化工機株式会社

モニター試験の提案について

代表取締役社長 中川 祥示

近年の工業の高度発展に伴い、使用する化学物質は、多様化し使用条件も過酷なものとなる場合も少なくありません。材質的には、耐食性だけでなく、耐熱性、耐溶剤性、耐油性、耐摩耗性、耐透過性などを考慮し、過去の実績や実験データから使用可能かを判断することになります。前年度、「TEXEL 耐蝕ポンプ 耐食データブック」発刊しましたが、引き続き、「マグネットポンプの耐スラリー性について」を発刊し、お客様方に配付しています。これは、過去のお客様への納入実績から、ポンプの薬液、スラリーに対する適用性を示したものですが、すべてを網羅するものではありません。使用条件例がない場合、ある程度物性から予測できますが、お客様に納得いただくため、場合によっては、モニター試験を提案しています。

本報でも紹介していますが、ポンプでは、ケミカルスラリー液に対し TSU 形、コンタミレスの要求に対しては磁気浮上ポンプのモニター機納入し、運転の結果が良好であれば、購入をお願いしています。また、使用条件下での材質の適用性をみるため、サンプル提供も行っています。

排ガス処理装置では、特に白煙処理に対し、荷電式または、回転体スクラバのテスト機を納入または当社工場内での立会で性能を確認していただいています。

モニター試験を通じ、お客様のニーズに応えることができればと考えておりますので、今後とも、かわらぬご愛顧を賜りますようよろしくお願いいたします。

ステンレス鋳物製小型立形ポンプ VEX 形

機械事業部設計課 本庄 純也

1. はじめに

金属表面処理のアルカリ脱脂工程（使用液：苛性ソーダ、界面活性剤）において、これまでステンレス製の立形ポンプを納入した実績がある。シンプルな構造でメンテナンスが容易との評価がえられたが、製缶加工品であったため、加工や溶接に伴う製作時間がかかり、かなり高価な製品となっていた。

金属表面処理では、これらのポンプは、多台数使用されており、製品コスト低減と多台数生産に対応するため、ステンレス鋳造品の開発を行った。

また、今回の開発では、メンテナンス性アップのため構造をさらに簡素化すること、ランニングコスト削減のためポンプ効率の向上に取り組んだ。

2. 製品仕様

1) 開発機種

VEX 形ポンプ

（図 1：製缶加工品のモデルチェンジ）

2) 口径

25A

3) 性能

60L/min × 6m (50Hz)

50L/min × 10m (60Hz)

4) 出力

0.75kW (TEFC/d₂G₄/eG₃)

2P 仕様：50/60Hz

5) 材質

ケーシング、インペラ、胴管：SCS14A
(SUS316 相当)

ベース：FC200

主 軸：SUS304

6) 構造

・駆動…電動機直結（継シャフト）タイプ

・ガスシール…V リング

・インペラ…セミオープンタイプ

7) 使用可能温度範囲

0～90℃

8) 回転方向

時計方向（電動機側より視）

9) フランジ

25AJIS10KFF 相当

10) 電動機

汎用フランジ 2 極誘導電動機

11) 重量

約 32kg



図 1. VEX 形ポンプ外観

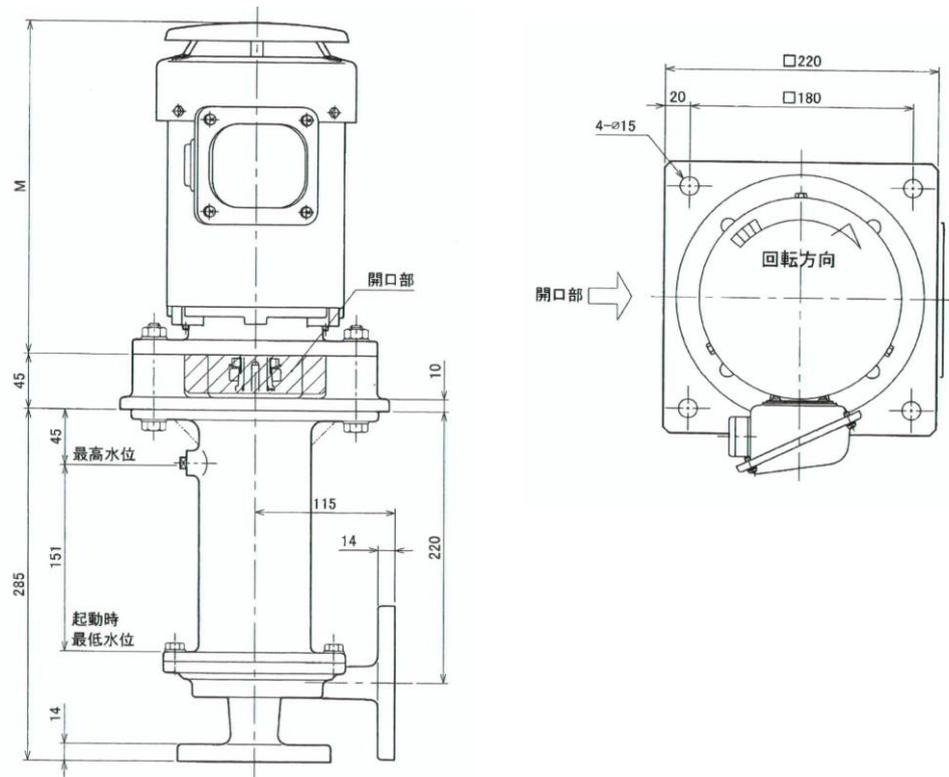


図2 外形寸法図

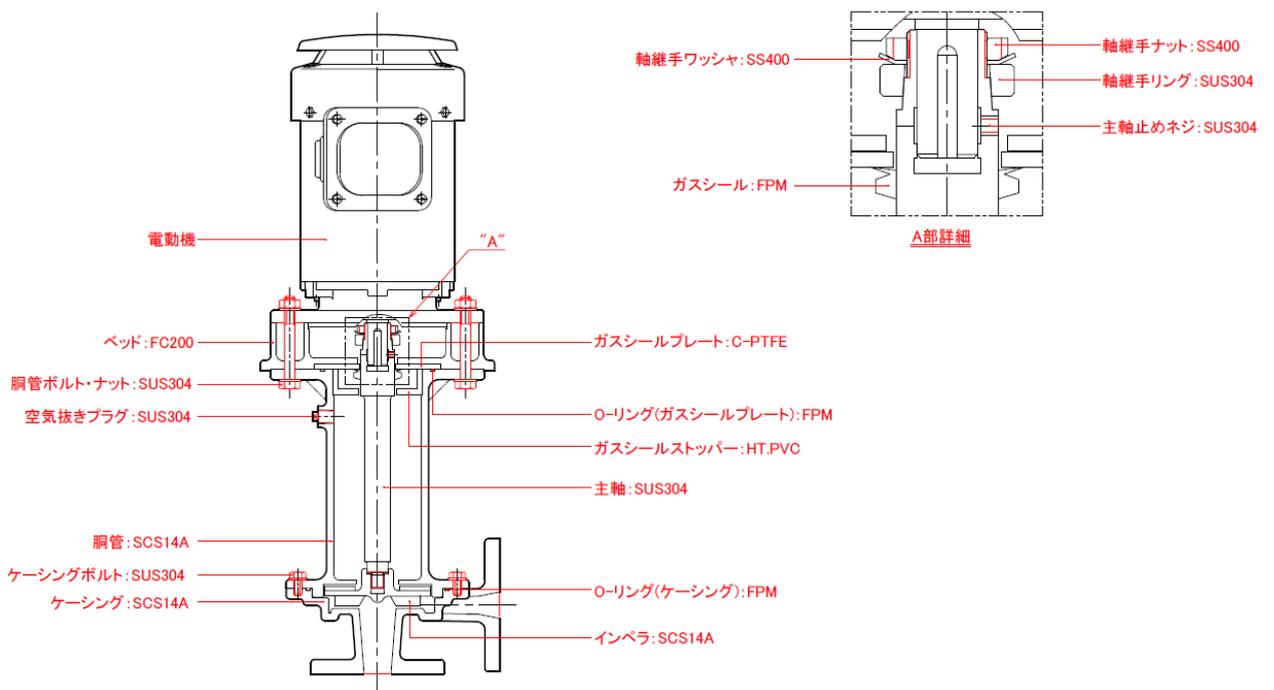


図3 断面構造図

3. VEX 形ポンプの構造と特徴

図 2,3 にそれぞれ外形寸法図、断面構造図、図 4.5 に性能曲線を示す。

接液部であるインペラ、ケーシング、胴管には SCS14A (SUS316 相当)、主軸には、SUS304、また、非接液部であるベースには FC200 を使用している。軸封からのガス漏洩対策として V リングによるガスシールを備え、V-リングの落下防止としてガスシールストッパーを備えた槽外形ポンプである (図 3,6 参照)。

既存製缶加工品と比べ製品コストは約 50%の低下がみこめ、渦室を最適な形状に設計することにより、ポンプ効率も約 20%ポイント改善した (既存製品は真円形状のため低効率)。また、部品厚みの見直しにより、重量は 40%減と大幅な軽量化にも成功し、メンテナンス性の向上も実現している。ただし、鋳造品であるため、性能、寸法などの変更は原則出来ない。



図 6 鋳造部品

4. おわりに

ステンレス鋳物製の小型立形ポンプは、これまで、当社としてはラインナップがない製品である。多台数納入、コスト低減、ポンプ効率アップ、メンテナンス性の向上を目標として開発した。

販売時期は、モニタとして納入確認後の 2018 年 8 月になる予定であるが、表面処理工程だけでなく、他の用途にも使用していただければ幸いである。

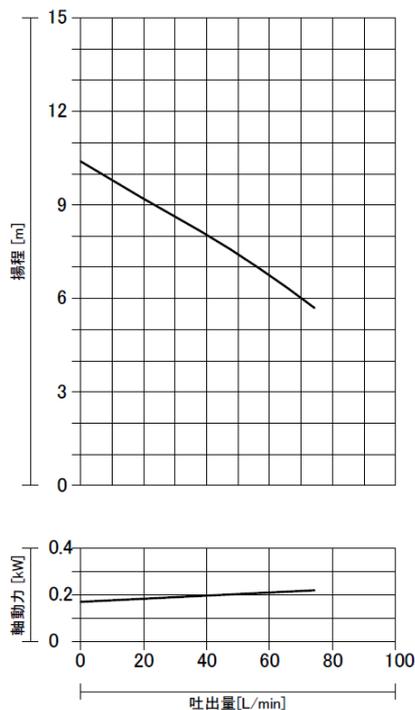


図 4 性能曲線 (50Hz)

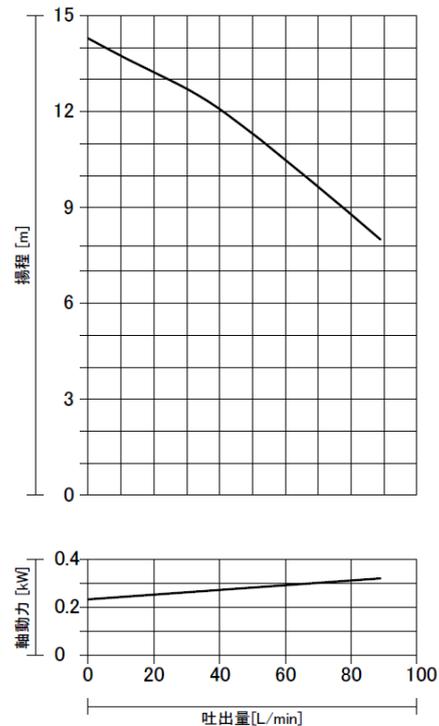


図 5 性能曲線 (60Hz)

TSU 形ポンプの運転状況について

機械事業部設計課 續木 毅

1. はじめに

TSU 形ポンプ（図 1）とは、接液部に耐食・耐摩耗特性に優れた超高分子量ポリエチレン樹脂（UPE）を使用したケミカルスラリーポンプで、現在規格化を進めている。規格化を進めるにあたり、種々のスラリーに対する実機運転における内部摩耗度合いの把握が、非常に重要となってくる。

摩耗の度合いは、含有スラリーの種類や粒度・硬度により様々であり、それら全てに対応可能なものとするのは困難であるが、耐摩耗特性を念頭に置き、かつ、性能・製作上の加工性・メンテナンス性（組立易さ）を考慮した形状・構造とすることが求められる。

本報では、現在、実機運転において使用されている TSU 形ポンプについて、お客様の御協力のもと定期的な解放点検を実施している特徴的なスラリーを含む薬液移送ポンプの運転状況について紹介する。



図 1 TSU 形ポンプの外観

2. アルミ建材スラリー

1) 運転条件

表 1、図 2 にそれぞれ、ポンプの仕様、運転フローを示す。

表 1 ポンプ仕様

形式	TSU-0652E05UAW6
仕様	21m ³ /hr(350L/min)×15m
使用液	水酸化アルミ スラリー
液比重	S.G=1.25
温度	50℃
納入日	2015 年 11 月 6 日

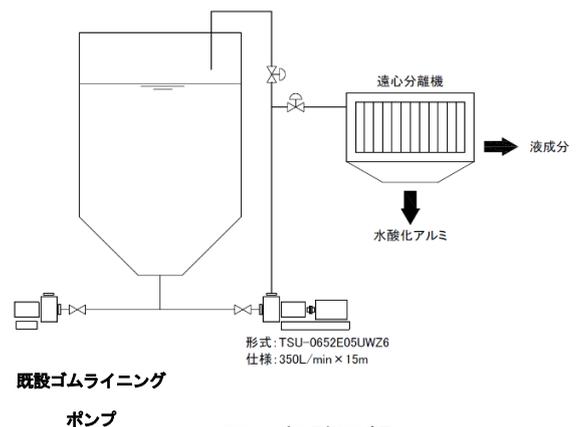


図 2 概略運転フロー

ポンプは、水酸化アルミニウムの濾過用として使用され、基本的に 24hr 連続運転である。タンク内の水酸化アルミニウム濃度が設定値に至るまでは、ポンプ～タンクサイロ内の 24hr 連続攪拌運転を行い、スラリー濃度が設定値になると電動バ

ルブにより、遠心分離機側へ切替えて製品ラインへ送液される。当工場内において最もスラリー条件が厳しい。

2) 内部摩耗度合

運転開始から3ヶ月後に解放点検を行ったが、インペラ羽根外周部、羽根根元部、バランスホール周辺部に多少摩耗が確認されたが(図3)、インペラ羽根側のケーシングには摺動痕はあるが顕著な摩耗、ダブルメカニカルシールについての液漏れ、摺動面異常等は認められなかった。

運転開始6ヶ月後の解放点検(図4)では、インペラ羽根部が全体的に激しく摩耗、性能ダウン(現地圧力計数値、運転電流値、流量低下)が認められ、PVDF製のインペラ背面側スタフィングボックス内周部、軸スリーブも摩耗が進行していた(図5)。



図5 PVDF製スタフィングボックス内周部(7ヶ月)

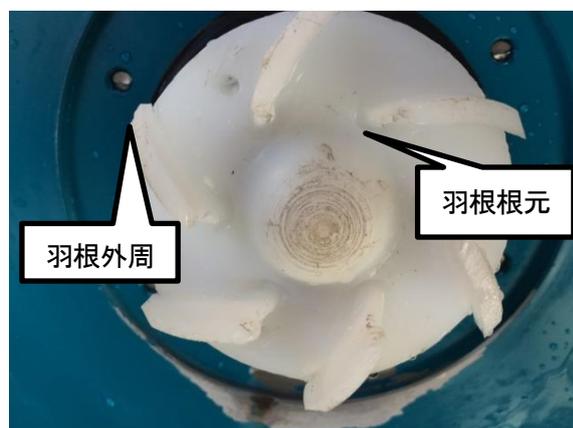


図3 インペラ摩耗状況(3ヶ月)

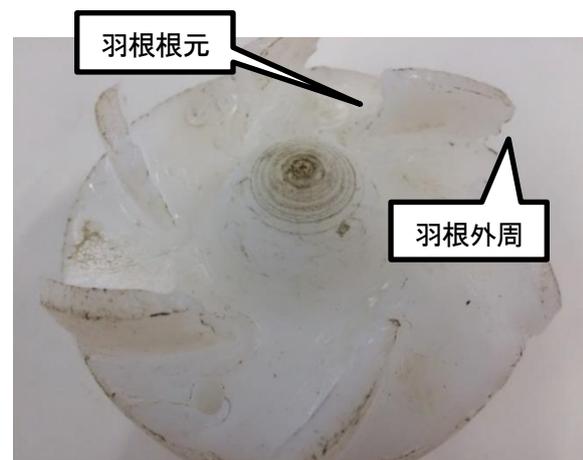


図4 インペラ摩耗状況(6ヶ月)

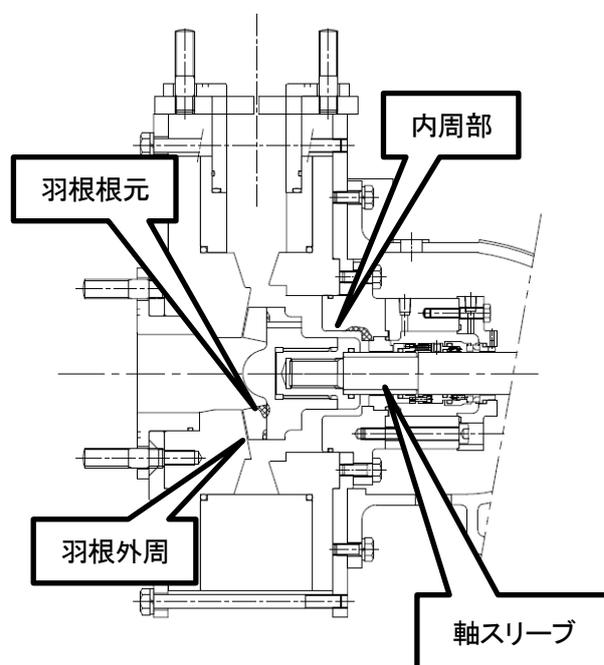


図6 摩耗部位(断面図)

3) 摩耗対策

現状では、6ヶ月以内でのインペラ交換を余儀なくされるため、耐摩耗グレード UPE をインペラに採用した(図7)。通常の UPE の分子量が500万に対して、耐摩耗グレード UPE の場合900万となっているのが大きな違いである。

また、スタフィングボックスについては、当初、使用温度条件、加工性から PVDF を採用していたが、耐摩耗性向上のため UPE へ変更した。スタフィングボックス内周部の摩耗は材質的な問題もあるが、スラリーがスタフィングボックス内周部

に滞留し摩耗を進行させたと考え、図 8,9 に示すような内周部形状にテーパを設け、強制的にスタフリングボックス内に速度差を与える構造とした。

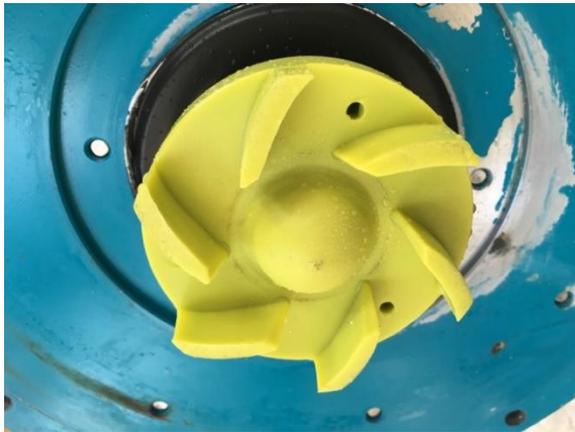


図 7 耐摩耗グレードインペラ

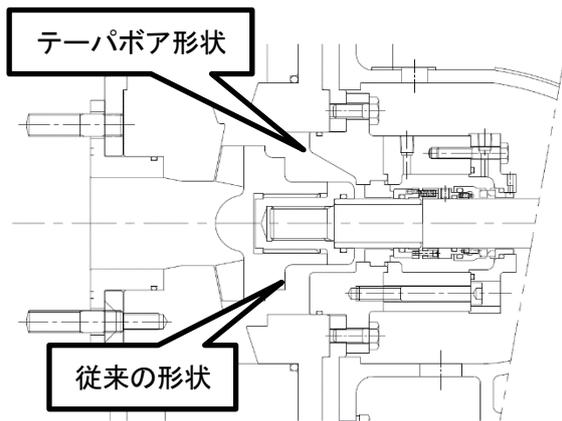


図 8 スタフリングボックスの改善



図 9 テーパポア形状

4) 対策後の状況

当該ポンプは、循環ライン+製品ライン運転において、24hr 連続運転となっていたが、ポンプ性能を確定するまでの期間、断続的なバッチ運転となっていた。循環ラインの連続運転は既設のゴムライニング製ポンプを使用し、運転開始 7 ヶ月からは、TSU 形ポンプにて連続運転を開始された。連続運転から約 5 カ月の開放点検状況を図 10、11 に示す。



図 10 インペラ摩耗状況 (5 ヶ月)



図 11 テーパポア形状 (5 ヶ月)

耐摩耗グレードインペラは、連続運転 5 ヶ月で羽根根本とバランスホール出口に摩耗が確認されたが、交換前バッチ運転で 6 ヶ月持たなかったのから考えて、延命効果は発揮できていると判断できる。スタフリングボックス内周部に設けたテーパポア形状は劇的な効果を発揮しており、摩耗は一切なく（図 11）、軸スリーブの摩耗についても大きく進行していなかった。本開放点検では、軸スリーブの材質を PVDF から Hastelloy C へ変更

した。耐摩耗試験（社内）では大きな摩耗差異はないが、水酸化アルミスラリーが非常に高い硬度のため、金属を採用した。



図 12 軸スリーブ交換

連続運転から 10 ヶ月後の開放点検状況を図 13 に示す。



図 13 インペラ摩耗状況（連続運転：10 ヶ月）

大きな性能低下はみられなかったが、インペラ羽根根元部、外周部が激しく摩耗、ケーシング内部についても摩耗が進行している状況であった。

スタフィングボックス内周部については摩耗もなく健全な状態を保持できていた。

UPE 材料の耐摩耗グレードを向上させることで明らかに、インペラの摩耗の進行を抑えることができたが、更なる延命化するために、CFD 解析によるインペラ形状の最適化を検討した。

5) 解析と最終形状

実際の羽根の摩耗箇所と CAE 浸食解析が一致することを確認し、インペラ羽根根元部への R 加工の大きさにより浸食範囲が分散する傾向があるという結果が得られた（表 2）。

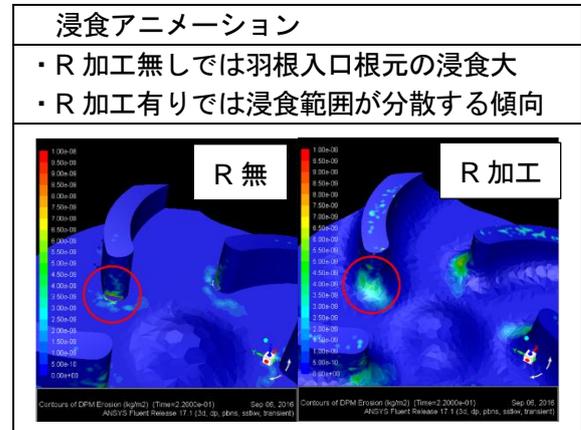


図 14 浸食アニメーション

解析結果より、インペラ羽根根元部に R 加工を設けたインペラに交換し運転を継続した。しかしながら、根元 R 加工の効果はあるものの、バランスホール出口、羽根根元部に摩耗は進行している状況で、また、納入当初から交換を行っていないケーシングについても、摩耗が進行しており、若干であるが性能ダウンが確認された。

インペラ UPE 材料グレード向上、スタフィングボックス材質変更（PVDF→UPE）、及びテーパポア形状、軸スリーブ材質変更（PVDF→ハステロイ C）、インペラ形状変更（羽根根元 R 加工）により、納品してから継続して運転を行えている実績より、ユーザーからは高評価を得ることができたが、2017 年 12 月の最終形状として納め、現在に至っている。

最終形状については、次のとおり改良したものとした。

- ① スラリーによる衝突摩耗を緩和するための主板部のグラウンド側への傾斜形状
- ② 羽根厚みの増大（摩耗に対する延命）
- ③ バランスホールをなくすためのフルオープン（フラットベーン）インペラの採用
- ④ シール部の削減、組立・分解の容易さを考慮した吸込カバーとケーシングを一体構造（UPE 厚板による加工品）

3. 石膏スラリー

1) 運転条件

表 2、図 15 にそれぞれ、ポンプの仕様、運転フローを示す。

表 2 ポンプ仕様

形式	TSU-1501F40UAW6
仕様	150m ³ /hr(2500L/min) × 20m
使用液	リン酸、石膏スラリー
液比重	S.G.=1.6
温度	Max.60°C
納入日	2016年12月28日

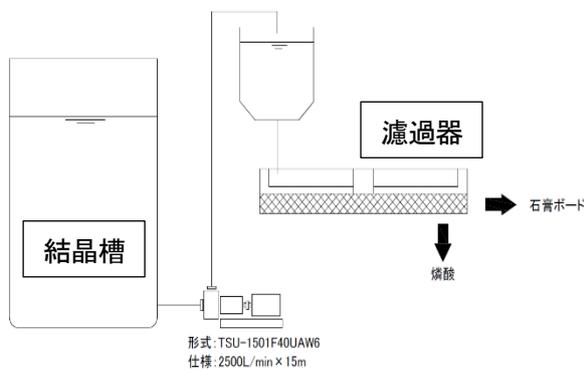


図 15 概略運転フロー

ポンプは、リン酸液製造工程で、リン鉱石と硫酸を混ぜ合わせた液を濾過器へ送る役目を果たしている。この過程で石膏が副生され、石膏ボードの原料となっている。石膏スラリーは濃度として30%以上含まれている。

既設ポンプは特殊金属製とゴムライニング製ポンプがあり、特殊金属製ポンプの取替えとしてTSU形を納品した。

2) インペラ

当該ポンプは、インペラ径が大きいいためインペラと軸との接続部(ボス部)の強度が必要となる。そのため、インペラのボス部分に金属を採用し、UPE樹脂内部にその金属をインサート成形する方法で製作した。この方法は、金型内部にインサート金属を挿入、UPE粉体原料を入れ、外部より加熱し、樹脂に圧力を加えて、金属インサートブロックを成型し、その後、切削加工によりインペ

ラ形状にするものである(図 16)。

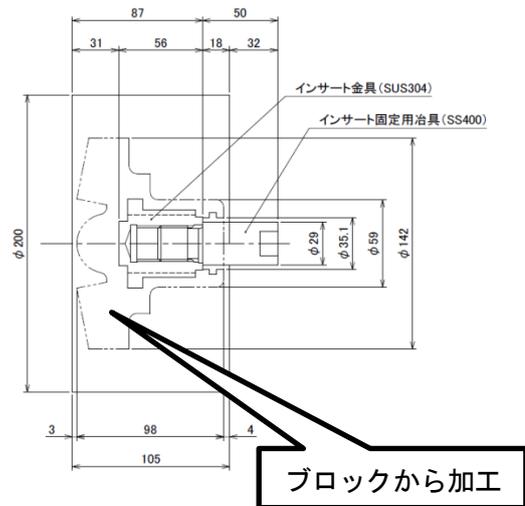


図 16 UPE 金属インサートインペラ

インペラ形状については、前項のアルミ建材スラリーで採用している形状をベースに決定した。フルオープンインペラ、羽根厚み増大、羽根枚数の削減を採用である。また、フルオープン形状はセミオープン形状と違い、スタフィンボックス内周部のテーパボア形状との相互作用により、スラリーが循環しやすい（堆積し難い）流れを形成していることが、実機運転の内部状況から把握することができている。

3) 運転状況

金属インサートインペラ採用の前に、同ラインで PVDF 製のインペラで運転したが、運転開始 10 日で性能低下が確認され、解放点検したところ、インペラの羽根部と主板外周部が極度に摩耗していた（図 17）。



図 17 PVDF インペラ運転時の内部と摩耗状況

現在、 UPE 製インペラに交換し継続して運転を行っているが、性能ダウンや激しい摩耗等は確認されていない。

4. おわりに

TSU 形ポンプは、スラリー性状や使用条件によって摩耗状況は様々である。現在、5 物件の運転状況を確認しているが、何れもお客様からの情報提供と御協力のもと、形状変更や構造変更を提案してきている。

今後も納入後の解放点検を継続して、スラリー性状に対する TSU 形ポンプの適用範囲を決定していきたいと考えている。

スラリー専用メカニカルシールのダブルメカニカルシール、デッドエンドメカニカルシールについても使用実績は年々増えており、様々な用途で採用されている。

直近では次亜塩素酸ソーダ製造ラインである低食次亜スラリー用途へ納入されている。耐食性、温度条件からも UPE の特性を十分に発揮できる用途であると判断している。

磁気浮上ポンプ MFB シリーズ

技術開発研究所 平櫛 真男

1. はじめに

磁気浮上ポンプは、電磁力を用いて、インペラ及び回転子をポンプケーシング内に浮上・回転させることによって、すべり軸受を必要としない完全非接触支持を実現した磁気軸受型シールレスポンプである。機械的摺動部材であるすべり軸受がないためコンタミレス、及び、消耗部品のないメンテナンスフリーを実現でき、さらに、空気混入運転や一定量の固形物含有液体の取り扱いが可能となる。

今回、従来の磁気浮上ポンプに加えて、新たに小型化した磁気浮上ポンプをシリーズ化した。その概略について説明する。

2. 五軸制御型軸受

MFB シリーズの磁気浮上ポンプは、図 1 に示したように五軸制御型磁気軸受を特徴としている。

本方式では、回転軸の方向を Z 軸とすると、スラスト方向 (Z 方向) の 1 箇所と、ラジアル方向 (XY 方向) の前後 2 箇所 (2 x 2) の計 5 軸にて回転子の位置検出を行い、フィードバック制御にて浮上制御を行う磁気軸受となっている。回転子の傾きに対して制御が行えるだけでなく、バルブ開閉操作等により、急激なスラスト荷重の変化があった場合にも、安定した制御を行うことができる。

3. 従来の磁気浮上ポンプ

五軸制御型軸受の特徴を活かし、大流量・高揚程に対応した磁気浮上ポンプとして、吸込口径 40A、吐出口径 25A である MFB-0402 を開発した。

本ポンプは、フランジ接続だけでなく、ネジ継手にも対応しており、その場合は、吸込 1 inch、吐出 1 inch となる。ポンプ性能は、最高揚程 34m、最大流量 180 L/min となっている。その外形図を

図 2 に示す。

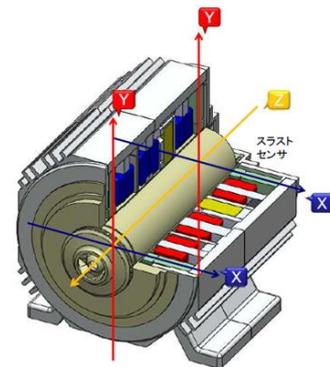


図 1 五軸制御方式

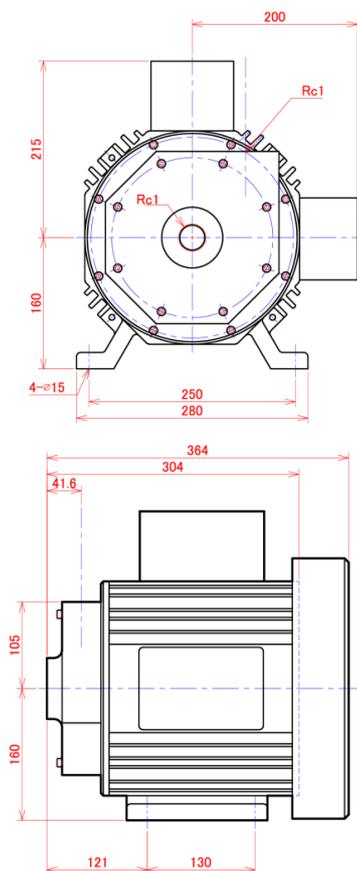


図 2 MFB-0402 の外形寸法図

4. ポンプの小型化

流量および揚程を限定し、小型化した磁気浮上ポンプについてもシリーズ化を行った。最大流量を 60 L/min に限定し、最高揚程を 20m とした MFB-0401 と、さらに性能を限定し、小型化を図った MFB-015 がある。それぞれの仕様を表 1 に示す。

表 1 MFB 仕様一覧

	MFB-015	MFB-0401	MFB-0402
吸込 x 吐出	1/2"x1/2"	(40x25) 1"x1"	
最大流量 (L/min)	20	60	180
最高揚程 (m)	20	20	34

また、MFB-0401 と MFB-015、従来の MFB-0402 の外形寸法を比較したものを図 3 に示す。MFB-0401 は、MFB-0402 と外径は同じであるが、長さ方向を短くした寸法となっている。MFB-015 は、さらに小型化を図り、本体幅を 280mm から 150mm まで小さくしたものとなっている。

さらに、図 4 に MFB-015 の接液部各部品の構成図を示す。接液部材質は、インペラと回転子ライニングが、PFA 製、リアケーシングが PTFE 製、ケーシングも、PTFE 製となっており、すべての部材が高耐蝕対応であるフッ素樹脂となっている。また、Oリングについても、フッ素ゴム製(FPM)を標準採用している。さらに高耐食性を有するパーフロエラストマー製の Oリングの採用も可能となっている。

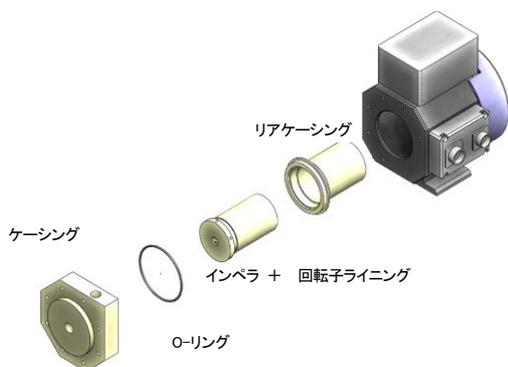


図 4 樹脂部品構成図(MFB-015)

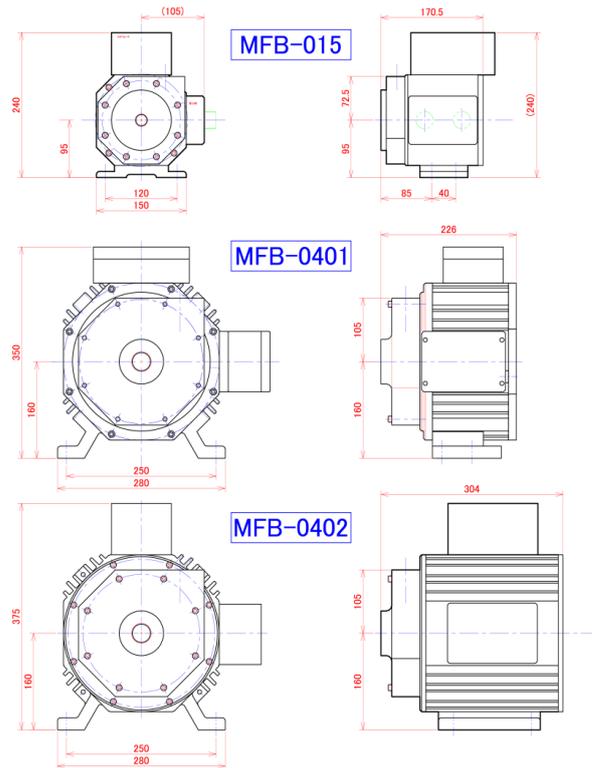


図 3 MFB シリーズの外形寸法比較

5. 磁気回路の吸引力と反発力を活用したスラスト軸支持力発生原理¹⁾

MFB-0401 と MFB-015 では、小型化を実現するために、新たな磁気浮上ポンプに適したスラスト軸支持力発生のための原理を考案した。本案では、スラスト巻線電流による磁束の向きは 1 方向のみであるが、それによって発生するスラスト軸支持力は、磁気回路の吸引力と反発力を活用することで、正負 2 方向に発生させることができるという特徴を持っている。

新構造のスラスト軸支持力の発生原理を図 5 と図 6 に示す。図 5 と図 6 において、赤線が永久磁石による常時存在するバイアス磁束、青線がスラスト巻線によって一時的に制御のもと発生する磁束を表す。磁気浮上ポンプにおいては、インペラの回転速度上昇に伴い、回転子には Z 軸の負方向に大きな外乱力が働く。

これまでの一般的なスラスト磁気軸受では、Z 軸の正負両方向に力を発生させるために、固定子が回転子を挟み込むように軸方向に配置されていた。そのため、回転子長が長くなり、ポンプ寸法

が大きくなっていった。

そこで、スラスト磁気軸受の固定子を回転子の右側のみに配置し、スラスト力の発生のために、回転子長が長くなることを防ぐ構造とした。

通常、ポンプ動作時はインペラの遠心力により吸込側が負圧となるため、回転子には、Z軸の正方向に力がはたらく。したがって、Z軸の負方向の外乱力を抑制するために、発生させるスラスト力は、Z軸の正方向の1方向のみでよいこととなる。そこで、図5に示すように、スラスト巻線電流をゼロにするだけで、永久磁石によるバイアス磁束が、スラスト磁気軸受の固定子にも流れ込み、Z軸の正方向にスラスト力が、吸引力によって発生する構造とした。

一方、起動時などの回転速度がゼロの場合は、Z軸の負方向の外乱力は発生しないため、前述の吸引力によるZ軸正方向のスラスト力をゼロにする、もしくは、Z軸の負方向にスラスト力を発生させる必要がある。そこで、図6に示すように、スラスト巻線に電流を通電することで、バイアス磁束とスラスト巻線による磁束との間に反発力を発生させ、Z軸の負方向のスラスト力を発生できるようにしている。

この省スペース化に寄与する、磁気浮上ポンプに適したスラスト軸支持力の発生原理は、特願2016-40009として、特許出願中である。

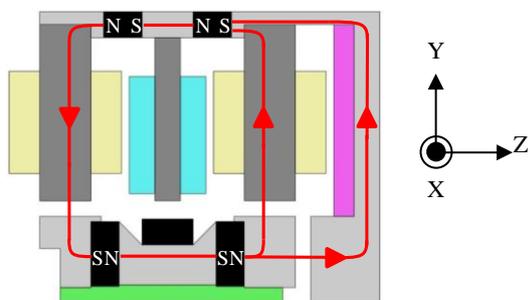


図5 スラスト力の発生原理($i_t = 0A$)

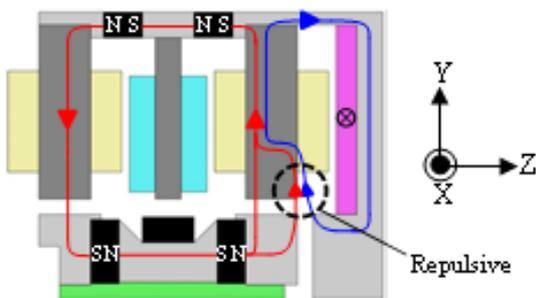


図6 スラスト力の発生原理(i_t : 定格)

6. ポンプ性能

磁気浮上ポンプの運転回転数は、インバータによる変速制御可能となっているが、それぞれのポンプの最高回転数である 5000min^{-1} での性能を図7に示す。これらの領域内であれば、それぞれの仕様に合わせた選定が可能となっている。

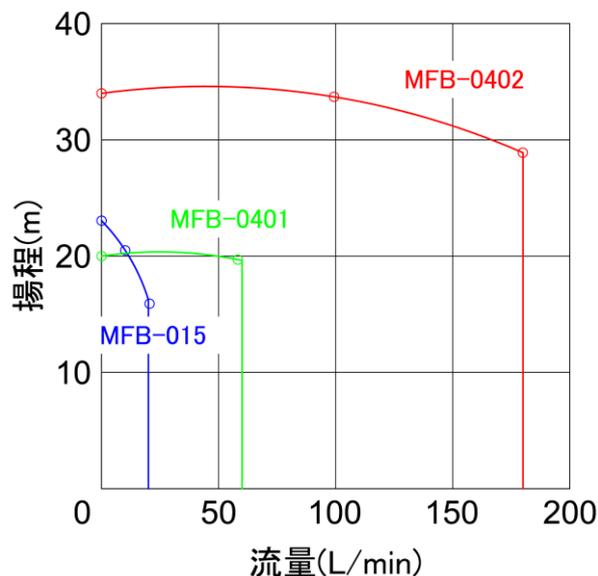


図7 最高回転数におけるポンプ性能

7. おわりに

最後に小型化を達成した MFB-015 の外観を図8に示す。本ポンプは、半導体産業や医薬品関連産業における高純度薬液等の分野、空気（気体）を含有する二相流体を取扱う用途等を想定し開発されたものである。

様々な仕様、用途に対応するため、高揚程・大流量対応の MFB-0402 から、MFB-0401、小型化された MFB-015 まで、モニタ機を用意した。それぞれの用途に合わせて試用していただければ幸いである。

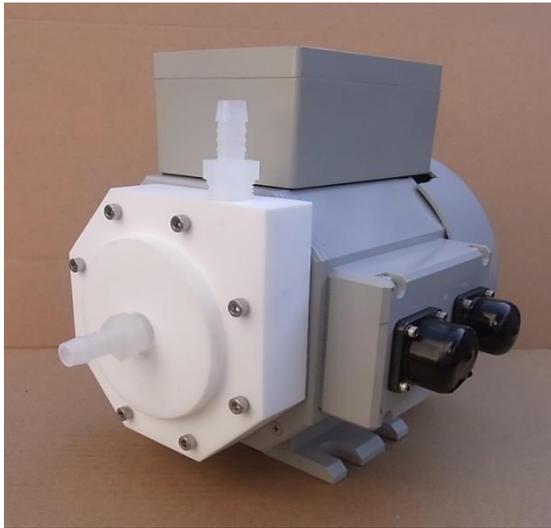


図 8 MFB-015 外観

参考文献

- 1) 奥村龍平、竹本真紹、小笠原悟司、平櫛真男：スラスト磁気支持に吸引力を加えて反発力を活用する五軸能動制御型磁気浮上ポンプの検討、平成 27 年電気学会全国大会論文集 vol.5, No.5-137, pp.210-211(2015)

耐食ドレンパン（TRS-HS形シリーズ オプション）

環境事業部設計課 大西 康浩

1. はじめに

近年、有害物質の漏洩や地下水汚染事例が毎年継続的に発生しており、この状況に対し水質汚濁防止法の一部を改正する法律が平成24年に施行され、有害物質を取り扱っている施設に対して構造等に関する基準の遵守と定期点検の実施が義務付けられた。対象施設となるスクラバでは循環タンクに漏洩防止対策が必要な場合があり、その対応として、ドレンパンの設置が有効である。

当社汎用スクラバである TRS-HS 形は 2016 年から販売を開始しており、この機種では水質汚濁防止法に対応できるよう耐食ドレンパンをオプション化している（図1）。



図1 TRS-HS形シリーズ 耐食ドレンパン

本報では、有害物質等漏洩防止に関連する法規制として、水質汚濁防止法、毒物及び劇物取締法について、それぞれ規制内容を整理し、スクラバへの適用について記載した後、ドレンパンの製品特長、仕様について紹介する。

2. 法規制について

2.1) 水質汚濁防止法（水濁法）

a. 概要

水濁法は、公共用水域への有害物質を含む排水の排出基準及び地下への浸透基準を定めたものであるが、前述のように、有害物質の漏洩などによる地下水汚染事例が増加していることに対し、平成24年に一部を改正した法律が施行された。

改正の概要は、有害物質による地下水汚染を未然に防止するために、有害物質の漏洩防止と漏洩が生じた際でも地下への浸透を防止するよう施設等の構造基準及び定期点検の方法を定めたものである。有害物質の取扱事業者は、届出、構造基準適合対策の実施、定期点検の実施と記録、保存が義務づけられている。

b. 有害物質とは

水濁法では人の健康に被害を生ずるおそれがある物質として28種類を有害物質として定めている（表1）。スクラバ循環液では25号_ふっ素及びその化合物、26号_アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物、2号_シアン化合物、5号_六価クロム化合物等が該当する場合がある。

c. 規制対象となる施設

従来の水濁法は、公共用水域に排水する施設が対象であったが、地下水汚染防止のための改正法

では、下水道に放流する有害物質使用特定施設と有害物質貯蔵指定施設が追加されている(表2)。

表1 水濁法で定める有害物質

水濁法施行令第二条 ～水濁法第二条第2項第一号で定める物質～

一	カドミウム及びその化合物
二	シアン化合物
三	有機燐化合物(ジエチルパラニトロフェニルチオホスフェイト(別名パラチオン)、ジメチルパラニトロフェニルチオホスフェイト(別名メチルパラチオン)、ジメチルエチルメルカプトエチルチオホスフェイト(別名メチルジメトン)及びエチルパラニトロフェニルチオベンゼンホスホネイト(別名E P N)に限る。)
四	鉛及びその化合物
五	六価クロム化合物
六	砒素及びその化合物
七	水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物
八	ポリ塩化ビフェニル
九	トリクロロエチレン
十	テトラクロロエチレン
十一	ジクロロメタン
十二	四塩化炭素
十三	一・二ジクロロエタン
十四	一・一ジクロロエチレン
十五	一・二ジクロロエチレン
十六	一・一・一トリクロロエタン
十七	一・一・二トリクロロエタン
十八	一・三ジクロロプロペン
十九	テトラメチルチウラムジスルフィド(別名チウラム)
二十	二クロロ一四・六-ピリス(エチルアミノ)一s-トリアジン(別名シマジン)
二十一	S-四クロロベンジル=N・N-ジエチルチオカルバマート(別名チオベンカルブ)
二十二	ベンゼン
二十三	セレン及びその化合物
二十四	ほう素及びその化合物
二十五	ふっ素及びその化合物
二十六	アンモニア、アンモニウム化合物、亜硫酸化合物及び亜硝酸化合物
二十七	塩化ビニルモノマー
二十八	一・四-ジオキサン

表2 水濁法に基づく規制対象となる施設

公共用水域に排水する事業場に設置する特定施設※1	改正以前から届出の対象となっている施設 水濁法第五条第11に基づく届出が必要。
有害物質使用特定施設	事業場からの排水(雨水を含む)の全量を下水道に放流する事業場に設置する特定施設※1のうちで、有害物質の製造、使用又は処理を目的とする施設(水濁法第二条第8)。 水濁法第五条第3に基づく届出が必要。
有害物質使用特定施設に係る汚水等が浸透する施設	汚水等を処理したものを含む。 水濁法第五条第11に基づく届出が必要。
有害物質貯蔵指定施設	指定施設※2のうちで、有害物質を含む液状の物を貯蔵する施設及び有害物質を含む水が地下に浸透するおそれがある施設(水濁法第五条第3項、水濁法施行令第四条の四)。 ドラム缶等での貯蔵は確認必要。 水濁法第五条第3に基づく届出が必要。

※1 特定施設：一定の要件を備える汚水又は廃液を排出する施設として定められており、74種類の施設に分類されている。65号_酸又はアルカリによる表面処理施設、66号_電気めっき施設、67号_洗濯業の用に供する洗浄施設等(水濁法施行令第一条別表第一)。

※2 指定施設：有害物質を貯蔵、使用、又は指定物質を製造、貯蔵、使用、処理する施設(水濁法第二条第4)。
なお、指定物質とは有害物質や油を除き、公共用水域に多量に排出されることにより人の健康や生活環境に被害を生ずるおそれがある物質として56種類が定められている(水濁法施行令第三条の三)。

d. 構造等の基準と点検

適用を受ける範囲には対象施設の本体のほか付帯する設備等が含まれ、次に示すような区分に応じ、構造等の基準とそれに応じた定期点検の組み合わせにより規定されている。

- ・ **施設本体**
点検のみ。構造等基準なし。施設本体から漏洩しにくいこと及び点検により漏洩が防止できる

としている。

- ・ **施設本体の床面及び周囲の床面**
防液堤等含
- ・ **施設本体に付帯する配管等**
継手類、フランジ類、バルブ類、ポンプ設備
- ・ **施設に付帯する排水溝等**
排水管、排水ます、排水ポンプ等含
- ・ **地下貯蔵施設**
- ・ **使用の方法**

尚、構造等の基準は水濁法第十二条の四に基づき、同法施行規則第八条の二～七により定められ、点検、記録については同法第十四条の5に基づき、同法施行規則第九条の二の二、第九条の二の三で定められている。

定期点検の内容は、主に破損等の確認、漏洩等有无の確認であり、目視点検可能な施設は、点検負担が軽くなっている。基本的に年に1回以上の点検を行い、点検結果は記録し、3年間保存することが義務付けられている。

e. スクラバへの水濁法適用について

スクラバでは、水濁法の特定施設（一定の要件を備える74種施設の排ガス洗浄装置）に該当する場合は届出が必要となる。特定施設に該当するスクラバが循環タンク等に有害物質を含む液を保有している場合、有害物質使用特定施設に該当し、漏洩を容易に確認できる場合を除き、床面及び付帯する配管等に対して地下への浸透及び外部への流出防止対策が必要となる。又本体を含め定期点検が必要である（ドレンパンが流出防止対策として防液堤等に該当する場合、想定される有害物質を含む水の流出量分を防止できる容量確保が必要である）。

尚、新設等のスクラバでは、特定施設に該当するかの判断が難しく、同じ装置であっても用途（業種）が異なれば特定施設に該当しない可能性があり、この場合水濁法の届出や構造基準が適用されない。又構造基準や点検等は対象区分により異なる内容もあり複雑である。環境省「地下水汚染の未然防止のための構造と点検・管理に関するマニュアル（第1.1版）」¹⁾で確認は可能であるが、実際には個々のスクラバに対して設置場所の管轄自治体に問合せ確認が必要である。

2.2) 毒物及び劇物取締法（毒劇法）

a. 概要

毒劇法は、日常流通する有用な化学物質のうち、急性毒性による健康被害が発生するおそれが高い物質を毒物や劇物に指定し、保健衛生上の点から必要な取締を行うものである。これらの物質を取り扱う場合には、毒物劇物営業者の登録制度、容器等への表示、販売（譲渡）の際の手続、盗難・紛失・遺漏等の防止の対策、運搬・廃棄時の基準などが定められ不適切な流通や漏洩等が起きないように規制されている。

b. 毒物及び劇物とは

毒劇法第二条で、動物に対する急性毒性・皮膚に対する腐食性・眼等の粘膜傷害性・蓄積性やヒトに対する知見を判定基準とし、毒物、劇物、特定毒物を定めている。

- ・毒物・・・毒性の高いもの、27品目（+97品目）
- ・劇物・・・刺激性の強いもの、93品目（+298品目）
- ・特定毒物・・・特に毒性の高いもの、9品目（+10品目）

ただし、（ ）内数値は、毒物及び劇物指定令で追加されている品目（最終改正2017年6月）で、医薬品及び医薬部外品は含まれない。

c. 規制対象となる施設及び基準等

施設や設備に関する構造基準は法令では規定されておらず、厚生労働省の通知で、毒物及び劇物の貯蔵に関する構造・設備等の基準、日常点検、定期検査等が定められている。²⁾

取扱は毒劇法第十一条で定められており、その中で、毒劇物又はその含有物であって政令で定めるものについて、危害防止の措置として、飛散、漏洩、流出、地下への浸透の防止を必要としている。政令で定めるものは、①無機シアン化合物含有（液体状1mg/L以上）、②塩化水素、硝酸、硫酸、水酸化カリウム、水酸化ナトリウムをいずれか含有する液体状のもので、pH1以下又はpH13以上のものである（毒劇法施行令第七章第三十八条）。

e. スクラバへの毒劇法適用について

スクラバでは、pH1以下又はpH13以上の洗浄液を保有する循環タンクが、ドレンパン設置対象である。また、薬液注入用の貯留タンクも成分、濃度、医薬用外劇物の表示に加え、流出防止対策（ドレンパン）を講じなければならない。

届出は不要であるが、毒物・劇物を取り扱う事業所では、毒物劇物危害防止規定を作成の上、取扱の管理が求められる（漏洩事故では、関係機関への通報が義務づけ）。

3. ドレンパン 製品特長

スクラバでドレンパンの設置が必要となるケースをまとめると

- ① 水濁法の特定施設であり、かつ、循環液にふっ素化合物、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物、硝酸化合物、シアン化合物、六価クロム化合物のいずれかが含まれる場合（濃度に

関係しない)

② バッチ運転などで pH13 以上の高アルカリ循環液を使用する特殊な場合である。

今回紹介する汎用スクラバ TRS-HS 形のドレンパンは、FRP 製と SS 製の二種類の材質で機種毎にシリーズ化した。FRP 製は、軽量化およびコストを重視し、今回、新規採用したものである。SS 製は、耐食を考慮し内面に FRP フレークライニングを施している。

尚、従来、当社のドレンパンは、強度面から循環

タンク底部にベースを設置し、外観上複雑な構造であったが、今回、ドレンパン自体の構造を改良し、FRP 製、SS 製とも循環タンクベースが無くドレンパンとタンクが一体化したコンパクトな構造とした。

4. ドレンパン 製品仕様

TRS-HS 形の各機種に対応した FRP 製及び SS 製のドレンパンについて、その仕様を図 2、表-1)、表-2)、表-3)に示す。ドレンパン容量は、循環タンク容量の 110%以上である。

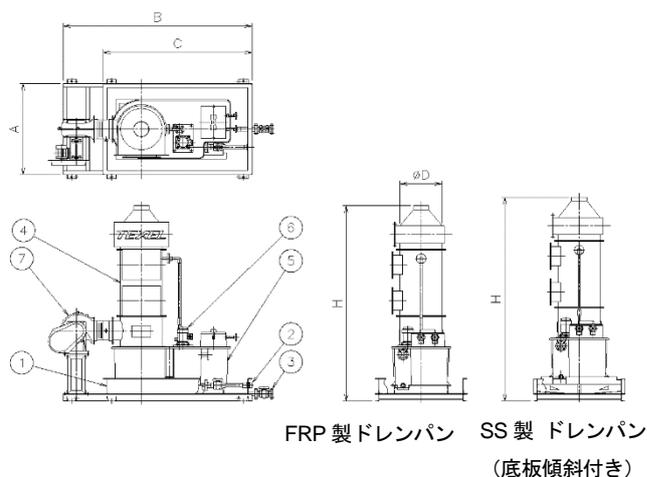


図 2 寸法図

表 3-1) 材料表

	品名	材質	摘要
①	ドレンパン	FRP、SS ^{※1}	
②	循環タンクドレン	PVC	40A ソケット
③	ドレンパンドレン	PVC	40A JIS10KF
④	洗浄塔	FRP	TRS-HS形
⑤	循環タンク	FRP	
⑥	循環ポンプ	G-PP	
⑦	送風機	FRPP、FRP ^{※2}	

表 3-2) 寸法表

スクラバ形式 ^{※3}	各部寸法 [mm]						循環タンク容量 [L]	ドレンパン容量 [L]	
	A	B ^{※4}	C	φD	H			FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン
					FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン			
TRS-HS25	1210	2525/2760	2000	550	2593	2708	350	400	395
TRS-HS50	1460	2830/3170	2250	800	2858	2973	600	710	680
TRS-HS80	1760	3300/3600	2550	1000	2858	2973	820	990	945
TRS-HS120	1960	3225/4375	2450	1200	2858	2973	900	1065	1015
TRS-HS160	2160	4535/4785	2800	1400	2858	2973	1140	1360	1290

表 3-3) 重量表

スクラバ形式 ^{※3}	シロッコファン仕様				ターボファン仕様			
	製品重量 ^{※5}		運転重量 ^{※6}		製品重量 ^{※5}		運転重量 ^{※6}	
	FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン	FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン	FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン	FRP製ドレンパン	SS製ドレンパン
TRS-HS25	290	435	1205	1355	335	480	1255	1405
TRS-HS50	415	590	2070	2265	500	680	2100	2300
TRS-HS80	535	755	2655	2880	630	840	2750	2940
TRS-HS120	610	840	2950	3140	740	1010	3090	3320
TRS-HS160	860	1140	3815	4045	870	1175	3925	4090

※1 SS製は内面はFRPフレークライニング仕様。

※2 シロッコファンの場合は、ケーシング、羽根車ともFRPP、ターボファンの場合は、ケーシングFRP、羽根車G-PP (FRPも対応可)。

※3 ガス処理風量 [m³/min] TRS-HS25 : ~ 25、TRS-HS50 : 26~ 53、TRS-HS80 : 54~ 83、TRS-HS120 : 84~120、TRS-HS160 : 121~165

※4 シロッコファン仕様での寸法/ターボファン仕様での寸法。

※5 製品重量は送風機、洗浄塔、ドレンパンを含む装置全体の重量である。

※6 運転重量はドレンパン満水状態で算出。

5. おわりに

本報では、スクラバでの有害物質等漏洩防止対策の必要有無について、関連する法規制を基に記載したが、実際に新設等の際は、個々のスクラバに対して設置場所の管轄自治体に問合せ確認を行って頂きたい。

また、今回ドレンパンに関して TRS-HS 用の仕様を記載しているが、既設スクラバに対してもドレンパンの設置、改造は対応可能であり、その際には弊社まで相談願いたい。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局 土壤環境課 地下水・地盤環境室, 「地下水汚染の未然防止のための構造と点検・管理に関するマニュアル (第 1.1 版)」, 平成 25 年 6 月,
<http://www.env.go.jp/water/chikasui/brief2012/manual/main.pdf>
- 2) 厚生労働省 医薬・生活衛生局化学物質安全対策室, 「毒物及び劇物取締法の規制の概要 貯蔵に関する構造・設備等基準 (通知)」
<http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/doku/gaiyou/kisei/zyoubun/kizyun/setubikizyun.html>

超音波を用いたポンプ実運転での配管内気泡検出について

技術開発研究所 高梨 武

1. はじめに

超音波式気泡検出装置とは配管外部にピエゾ（圧電素子）式超音波センサを接触させエコーを観察して、内部気泡混入量を監視するものである。

当社から出荷されるポンプの主流はマグネットポンプと呼ばれるシールレスの完全無漏洩タイプのポンプであり、高い耐食性と無漏洩性を評価されている。マグネットポンプは構造上の理由で空気巻き込み運転やキャビテーション運転を長時間行うと、すべり軸受部の自液による潤滑と冷却が不足し、ヒートショックが発生し SiC やアルミナといったセラミック製主軸が折損する。

簡易的な気泡検出装置としては電流値に基づく製品があり、予め、締切運転時の電流値、モータ定格電流値および仕様点での運転電流値から、異常運転用の設定電流値を定め、運転電流値がそれを下回った際に A 接点（Normal Open）や B 接点（Normal Closed）での信号出力をし、ユーザ配電盤のリレー等で受け、モータへの電源の共有を止めるなどの方法でポンプを保護している。原理が単純で安価な製品であるが、微小な気泡検出量での検出は困難である。

超音波式は配管などの適用条件はあるが、検出精度は非常に高く、微小な気泡も検出可能である。

現時点では市販化はなされていないが、2017 年秋に顧客での使用機会を得て、気泡検出に成功、液面の推奨水位の提案などを行うことができた。本報では、これらの内容に関し報告する。

2. 測定原理

音波は狭義では空気中を伝搬する圧力はであるが、広義では媒質は空気には限らず、液体や固体も伝搬する。また、人間の可聴域（20kHz）以上を超音波と呼び、様々な性質が利用されている。



図1 超音波センサとパルサーレシーバ

配管外壁にピエゾ式超音波センサを接触させると、センサ→配管壁→液→配管壁→反射→液→配管壁→センサと伝搬する。いわゆるエコーと呼ばれるものである。配管外壁と空気は音響インピーダンスが大きく異なるので、ほぼ全反射とみなせる。液中に気泡が存在すると気泡により散乱や乱反射するので、配管外からエコーを観察すると気泡がない健全な状態と比較すると減衰する。減衰の量は気泡量（以後はボイド率=気体/液体の体積分立）、気泡径などにより大きく影響を受ける。この減衰量により配管内部のボイド率を推定することができる。

3. ユーザでの性能試験

1) 実験装置・対象設備

今回、顧客に理解頂き、2017 年の秋に試験を

行った。試験条件を表 1 に示す。本試験では顧客が使用している実際の配管で試験させていただいた。

表 1 超音波式気泡検出装置試験条件

対象ポンプ	MTA-200 形
測定部配管径	200A
測定部配管材質	塩化ビニル（以下 PVC）
パルサーレシーバ	セイコー化工機 試作機
超音波用 그리스	ソニコート BS-400
センサ（ピエゾ式）	NDT systems C16 2.25MHz
オシロスコープ	Tektornix TPS-2024B

2) 配管条件

測定装置の概略を図 2 に示す。メインのタンクの液面水位を変更すれば、配管内への空気の巻き込み量が変化するので、液面高さから超音波エコーの関係を求めれば、マグネットポンプが安全に（気泡を巻き込まない）運転できる水位が分かる。

3) エコー波形

図 3 に気泡が混入していない状態での超音波波形を示す。横軸が時間で縦軸は超音波センサからの電圧である。都合により縦軸の具体的な目盛りは省いている。

時間 0 秒の電圧の山はトリガを示しており、トリガの発信と同時にパルサーレシーバからパ

ルス波が発信される。発信後、約 150 μ s 後に明確なエコーの波形が見られる。また、約 290 μ s 後に 2 回目のエコーが観察されている。

これらのエコーは、気泡混入量の増加と共に減少する。大まかな傾向を図 4 に示す。横軸はポイド率、縦軸は超音波センサからのエコー最大値の電圧である。都合により縦軸の具体的な目盛りは省いているが、一定の関係を示しながら、減少している。この関係を用いることで推定が可能となる。平均気泡径などの諸要素にも影響を受けるので、事前に校正・検定を行えば、測定精度はさらに向上する。

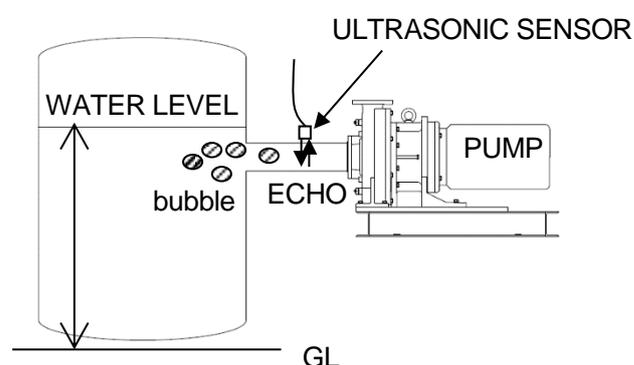


図 2 超音波エコー波形 概念

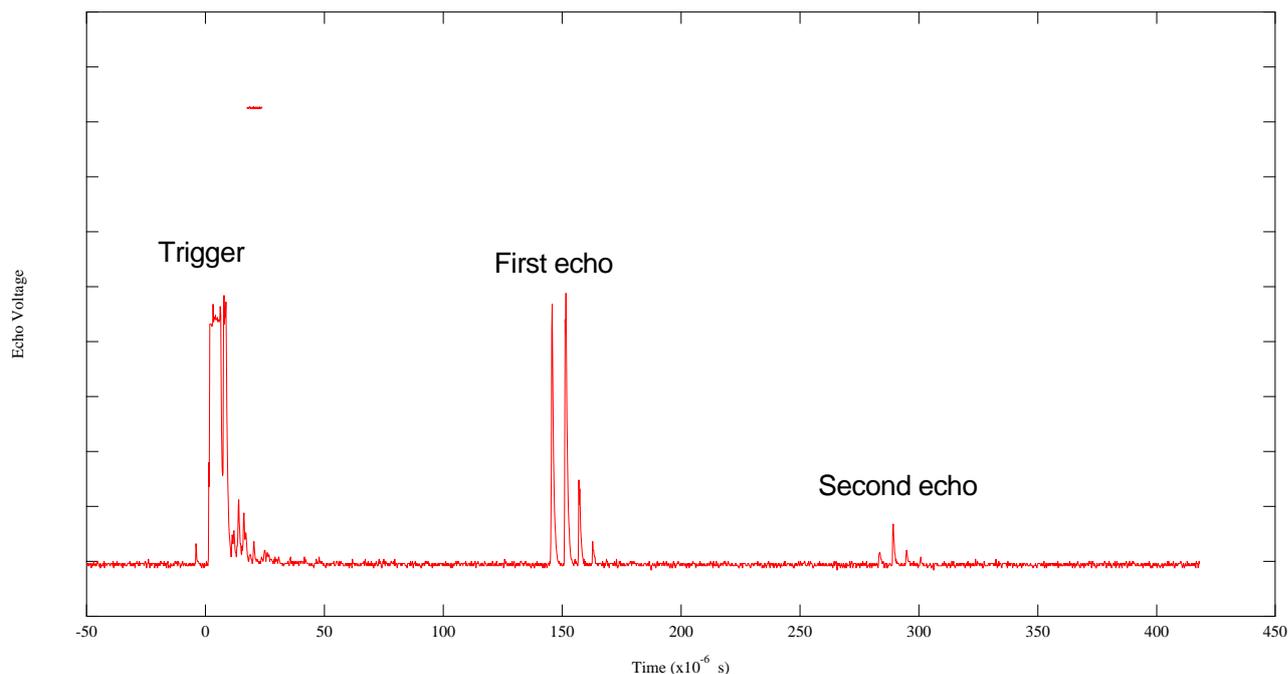


図 3 代表的な超音波エコー波形

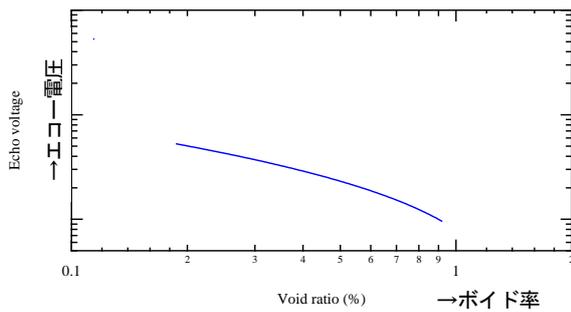


図4 ボイド率とエコー電圧

4) 気泡混入の判定

今回の試験では、気泡がほとんど混入していない状態を理想液面水位とし、その水位を本試験装置にて推定した。代表的なエコーと液面水位の関係を図5に示す。横軸が第1エコーの最大値で縦軸が液面水位である。縦軸は図2の液面レベルと対応している。グラフ右側にある縦方向の破線は、気泡が混入していない状態での第1エコーの最大値である。したがって、第1エコーが大き、すなわち、右側に行くほど、気泡が少ないことを示している。液面水位は約900~1400mmで変化させて頂いており、水位が低い900mmでは、エコー値はほとんど0であり、測定ノイズに埋もれている。配管は、内部が目視確認できるよう一部透明PVCに変更したため、十分に目視でも気泡が確認できた。逆に1400mmでは明確なエコーが見られ、目視でも気泡混入がない状態（縦破線）で、健全な運転状態であると判断できた。全体的には液面水位とエコー最大値との間には明確な関連性がみとれた。

4. 本装置に対する顧客の評価

本試験は、顧客立会のもと試験を行い、オシロスコープの表示画面を介して、リアルタイムで気泡混入状態を見ることができた。そのため、非常に説得力があった。この顧客では4塔の設備があり、オペレーションミスでポンプが破損した1塔を除けば、健全に運転できていると評価を頂いている。また、破損してしまった塔の再測定依頼も届いており（2018年3月末時点）、評価は良好だと思われる。

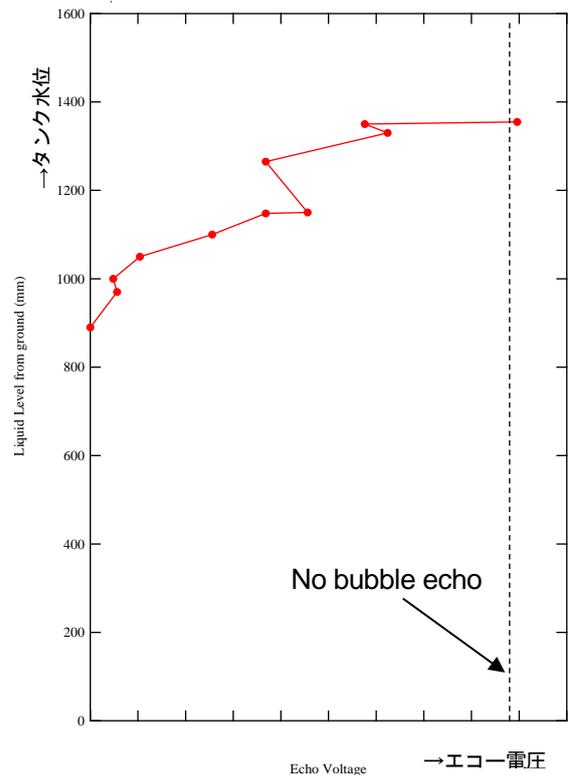


図5 エコー電圧とタンク水位

5. まとめと今後

顧客設置現場にて超音波試験装置を用いた気泡検出を行い、以下の結果を得た。

- PVC製の配管でエコーを検出することができ、気泡が混入するとエコーが減少することが、顧客配管でも確認できた
- 顧客設備のタンク液面水位とエコー高さの関係を求めることができた
- 気泡混入のない理想的な運転状態が可能な液面レベルを提案することができた

また、今回の配管はPVC製でエコー検出には理想的な配管であった。今後はライニング管などの明確なエコーが得づらい材質にもチャレンジしていきたい。

30年間使用した排ガス洗浄塔のFRP劣化診断

技術開発研究所 杉本 健一

1. はじめに

FRPは“軽くて強い”という特長から、近年では低炭素化社会の実現を目的として、航空機や自動車への応用が積極的に進められている。このようなFRPを構成する高分子材料(プラスチック、樹脂)には、金属材料と比べて耐食性に優れたものが少なくない。特に耐食性に優れた樹脂を用いたFRPは耐食用途にも広く使用されており、腐食性の化学薬品を基とした液体やガスの貯蔵、搬送に応用されている。FRPはこれらのタンクやダクト、送風機、ポンプ、洗浄塔などには不可欠な材料であるともいえる。少なからず腐食性を示す化学薬品が使用される産業としては化学、製薬、半導体、鉄鋼、食品など数多くが挙げられる。リサイクル性に問題があるFRPではあるが、耐食分野においては今後も一定の需要があることは相違ない。

耐食材料として重用されるFRPであるが、その優れた耐食性であるが故、設置から30年以上を経ても現役で稼働している装置も少なくない。FRPは強化繊維と樹脂の複合体であり、繊維や樹脂、繊維/樹脂界面の劣化が環境条件に応じて単独あるいは複合的に進行する。したがって、FRPの劣化機構は極めて複雑なものとなり、実機のFRPの劣化度合いを把握することは容易でない。この故に、メーカ、ユーザともに設備更新の時期を明確にできないという問題がある。

当社ではこのFRPの劣化に対して超音波探傷技術の応用による診断技術の開発を進めており、送風機の構成部品である羽根車や各種廃棄タンクのカットサンプル¹⁻²⁾、長期使用の洗浄塔³⁻⁴⁾における力学的強度と超音波エコーの相関性を評価する事により、診断技術としての可能性を検討してきた。

本報は、某半導体工場において設置から30年

以上が経過した現役のFRP製洗浄塔について、これまでと同様に超音波エコーによる評価を試みた。力学的強度と超音波エコーの相関性について、従来は強酸(硫酸、塩酸)、強アルカリ(水酸化ナトリウム)のデータを転用していたが、今回は実際の使用条件に近い真水による促進試験結果と比較した。また、促進試験のデータに対して、反応速度論に基づいたアレニウス則を適用し、一定温度下における長期間の劣化曲線からの寿命予測を試みた。

2. 洗浄塔仕様

評価に供した4基の洗浄塔の仕様は、表1に示すとおりである。型式番号以外の設置年月や排ガスの詳細といった仕様は不詳である。排ガスの洗浄には弱アルカリ(pH8~8.6)の水酸化ナトリウム水溶液を循環させている。いずれの洗浄塔も使用期間は約30年である。FRPの構成樹脂はビスフェノール系不飽和ポリエステル(以下、ビス系UP)、強化繊維はEガラス繊維である。

表1 洗浄塔仕様

装置記号	型式
A	TRS-B450
B	SBS-350
C	SBS-650A
D	SBS-455A

3. 超音波エコー

超音波エコーの測定条件を表2に示す。超音波の送受信及び探触子には、汎用の探傷装置および探触子を使用した。洗浄塔1基についてタンク、塔体それぞれ装置外側表面からランダムに20個

所のエコーを計測した。

各測定箇所においては、図 1 に示すようなエコー強度と透過距離の関係が得られる。図 1 の場合、測定箇所の板厚は 5mm、エコー強度は 58%となる。

表 2 超音波エコー測定条件

探傷器	UI25S、 菱電湘南エレクトロニクス
探触子	狭帯域型 5MHz
音速	2150m/s
ゲイン	10dB
測定点数	タンク、塔体それぞれ ランダムに 20 点

当工場で扱われる排ガスにはフッ化水素酸、塩酸ガス、硫酸ミストなどが含有するとされている。送風機により搬送されたガスは、タンクに貯蔵された弱アルカリ水をポンプで揚水し、洗浄塔上部からの散水による中和反応により濃度を低減させ、大気中に放出している。

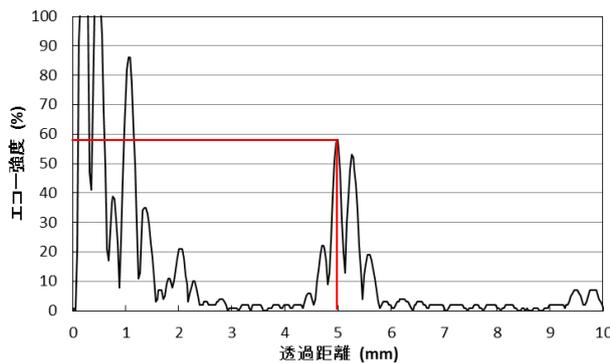


図 1 典型的なエコー強度と透過距離の関係

図 2 にブランク FRP におけるエコー強度と板厚の関係を示す。エコー強度は伝播距離(板厚)が長くなる程、減衰により低下するため、各測定点における板厚に応じたブランク材のエコー強度を読み取る必要がある。このようにして、各測定箇所におけるエコーの強度比を求める。ブランク材と同等のエコー強度であれば、エコー強度比は 1 になる。例えば、図 1 におけるエコー(板厚 5mm、エコー強度 58%)の場合、図 2 から板厚 5mm におけるブランク材のエコー強度 70%より、エコー強度比は $58 \div 70 = 0.83$ となる。

図 3 に各洗浄塔のタンク、洗浄塔のエコー強度比を示す。平均値を棒グラフ、最大値と最小値を誤差範囲としてそれぞれ示す。いずれの洗浄塔、部位においてもばらつきが大きかった。平均エコ

ノ強度比は洗浄塔 A が最も高く、C が最も低くなった。洗浄塔 4 基について、平均エコー強度比は概ね 0.6~0.8 の範囲であった。

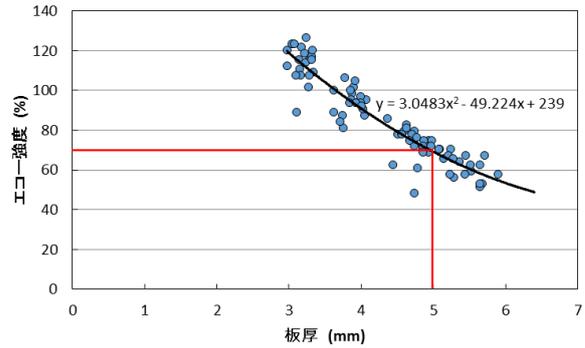


図 2 ブランク材のエコー強度と板厚の関係

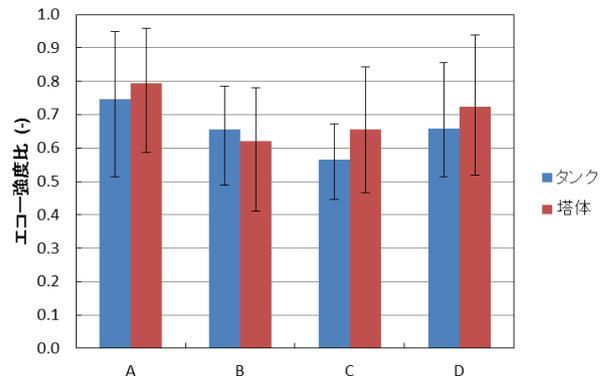


図 3 各洗浄塔のエコー強度比

4. 洗浄塔内部の外観

図 4-1 に洗浄塔 A のタンク内部、図 4-2、4-3 に洗浄塔 B のタンクと塔体内部の FRP 部の接写画像を示す。本診断を実施した定期メンテナンス時には、充填物や循環水の交換は行われるが、タンクや洗浄塔の内部の洗浄は未実施であった。このため内部全体を目視観察する事はできず、限られた範囲のみの観察となった。その他の洗浄塔についてはメンテナンス工程の都合により内部を見ることができなかった。

いずれの洗浄塔についても、FRP の構成樹脂はビス系 UP であり、元来は固有の色調である薄い褐色である。図 4-1、4-2 に示す写真から、FRP の色調は褐色であり、顕著な変色はみられない。図 4-3 に示す塔体内部の FRP は 4-1 や 4-2 のタンク内部と比べると褐色の度合いが濃いことがわかる。また、白い斑点や筋状の線として内部のガラス繊維が視認され、劣化の兆候が見受けられる。

洗浄されずに残留している無数の汚れが FRP 表面に見られるが、これらが固着しているのか、単純に付着しているのかは不明である。



図 4-1 洗浄塔 A タンク内部



図 4-2 洗浄塔 B タンク内部



図 4-3 洗浄塔 B 塔体内部

5. 温水促進試験による寿命予測

30年の使用が力学的特性に及ぼす影響を評価するため、温度を3段階に変化させた水道水にFRPを所定期間浸漬した促進試験を実施した。表3に

促進試験の条件を示す。供試FRPは既設品と同等の材料構成とし、両表面が平滑となるようにポリエステルフィルムを使用した。切り出したFRPサンプルを所定温度の水道水に浸漬させ、最長6ヶ月間浸漬させた。1ヶ月毎に取り出して外観の目視観察、曲げ試験、シャルピー衝撃試験を実施した。浸漬させる水は交換せず、蒸発による減少は追いついて対応した。

表 3 温水浸漬促進試験条件

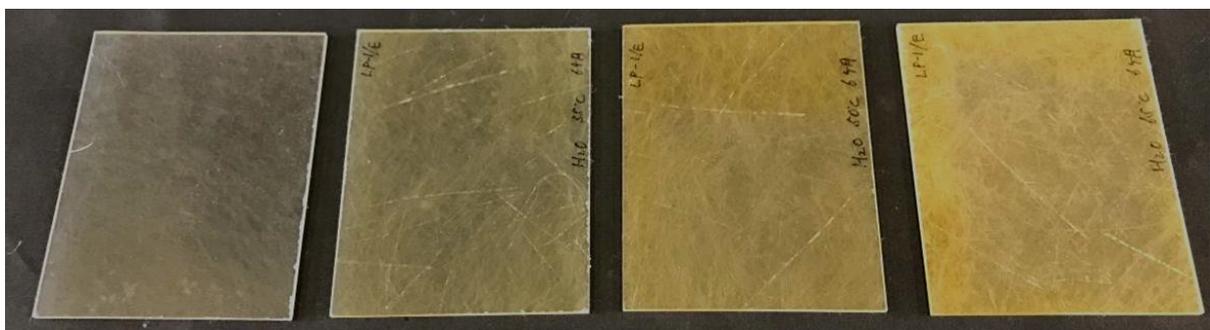
表面繊維	E ガラスサーフェスマット (両表面)
強化繊維	E ガラスマット (3枚)
母材樹脂	ビス系不飽和ポリエステル
板厚	3mm
浸漬温度	35°C、50°C、65°C
浸漬期間	1~6ヶ月 (1ヶ月毎に取出し)
評価試験	3点曲げ試験、シャルピー衝撃試験

1) 外観変化

図5に各温度で6ヶ月間浸漬させたサンプルの外観写真を示す。高温である程、blankと比較して黄変していることがわかる。また、白化した内部のガラス繊維が無数に見られた。blank材のような透明性は低下しているが、促進サンプル単体のみを見て劣化が顕著に進行しているとは判断が難しい変化といえる。このことは図4に示した既設品の外観写真と同様である。

2) 曲げ強度、衝撃値、エコー強度比

図6に促進サンプルにおける曲げ強度、シャルピー衝撃値、エコー強度について、blankとの比率として示す。曲げ強度や衝撃値は、同6ヶ月の浸漬期間であっても高温である程低下率が大きくなった。特に衝撃値の低下は顕著であり、65°Cにおける曲げ強度保持率が約0.7であるのに対し、衝撃値の保持率は0.2未満となった。力学的特性



blank

35°C6ヶ月

50°C6ヶ月

65°C6ヶ月

図 5 温水促進試験後の外観

の明らかな低下が見られる一方で、超音波エコーには全く変化が見られなかった。

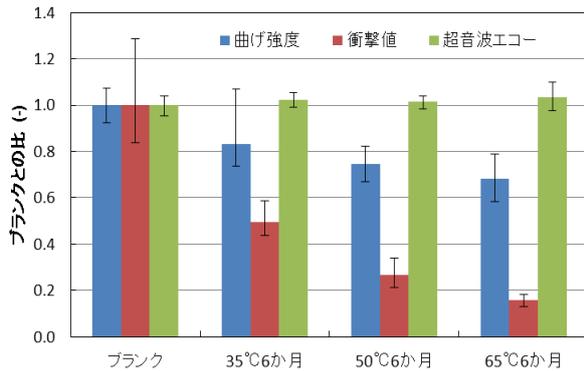


図6 促進サンプルの物性値の変化

3) 考察

(1) 超音波エコーの減衰について

固体中を伝播する超音波(弾性波)は媒質である物質によって減衰する。FRPの場合は樹脂やガラス繊維が媒質となる。ガラス繊維と樹脂の複合体であるFRPの劣化には大まかにガラス繊維の劣化、樹脂の劣化、繊維/樹脂界面の劣化が挙げられる。環境条件により劣化機構は様々に変化するが、劣化がエコーの減衰性に影響を及ぼすのは、主としてガラス繊維と樹脂の界面はく離という形態で劣化が進行する場合と考えられる。この界面はく離が巨視的に可視化されるのは、明らかにFRP透明性が消失する程度に内部のガラス繊維が白化する場合である。界面はく離が進行する劣化機構であれば、その度合いに応じてエコーも変動すると考えられる。

図5に示したように、温水浸漬における外観変化は小さいため、エコーが減衰するような界面はく離を生じず、結果としてエコーが変化しなかったと考えられる。曲げ強度や衝撃値の低下はFRPの劣化によるものであるが、厳密には主として母材樹脂の加水分解による劣化に起因したものと考えられる。

超音波エコーによる診断は、界面はく離を生じる劣化系に対して有効であり、そうでない場合には適していないといえる。

(2) 既設品におけるエコーの減衰について

促進試験の結果からは、真水と弱アルカリの違いがあるとはいえ、既設品でエコー強度が低下するのは矛盾していることになる。これについては推測となるが、製作時の表面の起伏や促進試験では考慮していない紫外線による劣化、内部の汚れ

の固着状況などが原因として考えられる。特に表面の起伏はエコーに甚大な影響を及ぼす。計測時において、少なくとも外表面は可能な限り平滑な場所を選んでいるが、その内部の反射面の状態までは確認出来ないため、全体として低いエコーになったと考えられる。

既報⁴⁾において、同様に弱酸や弱アルカリを循環水として20年~25年間使用した洗浄塔7基に関する劣化診断の結果について報告している。これらについて、図7に示すように、エコー強度は大きなばらつきを示しながらも大幅な低下が見られている。しかしながら、これらの原因は循環水によるFRPの劣化に起因したエコーの減衰ではなく、紫外線劣化や表面の凹凸であると考えられる点について訂正が必要である。

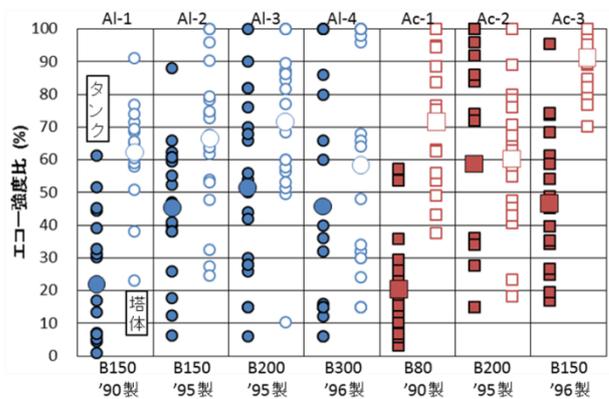


図7 弱酸、弱アルカリにおけるエコー強度比⁴⁾

6. アレニウス則による寿命予測

今回は30年が経過した洗浄塔の劣化診断であるが、超音波による診断は出来ない可能性が示された。そこで、促進試験のデータから化学反応速度論に基づいた寿命予測を試みた。

図8に促進試験から得られた各温度の曲げ強度保持率と浸漬期間の関係を示す。35°Cは1ヶ月で強度が増加した後、緩やかな低下傾向を示す。50°Cと65°Cに大差はないが、65°Cの方がやや低い値であり、浸漬期間に対して緩やかな低下傾向を示した。

図8における横軸の数値を月から時間に換算して対数を取ったものを図9に示す。各温度について、予想される強度低下曲線を併せて図中に示す。このグラフから、各温度について曲げ強度保持率が0.8に低下する時間を読み取り、それぞれの浸漬絶対温度の逆数を取ってプロットしたものを図10に示す。各プロットが直線状に並んでいることがわかる。

式(1)に示すアレニウスの式は、対数時間 $\ln t$ と

絶対温度の逆数 $1/T$ が活性化エネルギー E_a やガス定数 R を係数として直線関係になることを示唆している。これは、化学反応による劣化速度は温度に依存することを意味している。換言すれば、曲げ強度の低下速度が温度に依存しており、また任意の温度における強度低下が予測できることを示している。

$$\ln t = \frac{E_a}{RT} + C \quad (1)$$

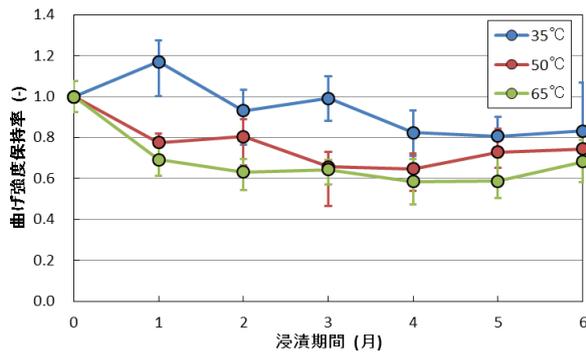


図8 曲げ強度と浸漬期間の関係

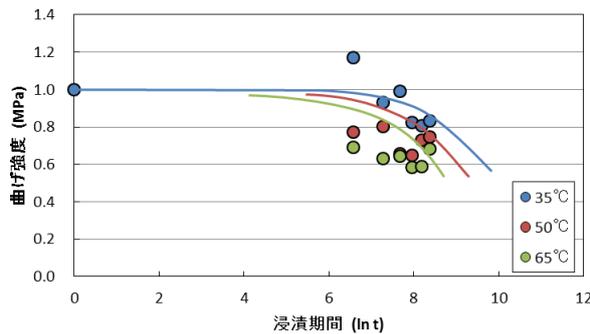


図9 曲げ強度と浸漬期間(対数時間)の関係

そこで、当洗浄塔が設置される某所の年間平均気温である 18°C における曲げ強度保持率0.8の対数時間と、各温度における同対数時間の差をアレニウスプロットから読み取り、その差を図9において各温度のプロットにシフトさせると図11に示す1本のカーブが得られる。この横軸の数値を年単位に変換したものが図12(傾向のみ示す)となる。同様の手順により求めた衝撃値の低下曲線も図12中に示す。

図12から推定すると、 18°C で30年後の曲げ強度は新品と比較して、半分以下まで低下、衝撃値も約9割程度と大幅な低下となった。これらはあくまで真水による樹脂の加水分解のみを考慮したものであり、実際に影響を及ぼすと考えられる紫

外線や弱アルカリの影響については考慮されていない。紫外線のみ、弱アルカリのみの寄与については不明確であるが、少なくとも実際にはより低い数値である可能性が強く考えられる。

主として樹脂の加水分解が支配的に進行すると考えられる水環境下の劣化において、衝撃値は強度と比較しても劇的な低下傾向を示すことがわかった。実際に設置後30年を超える設備は無数にあり、現役装置として稼働していることを考慮すると、洗浄塔における衝撃特性の重要度は高くはないといえるが、屋外に設置される場合は地震や突風による飛来物の衝突、メンテナンス時における治工具の不意の衝突により容易に破損し得るため、顧客への注意喚起が肝要といえる。

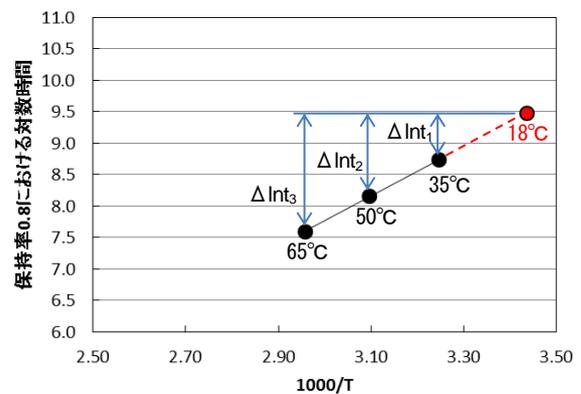


図10 アレニウスプロット

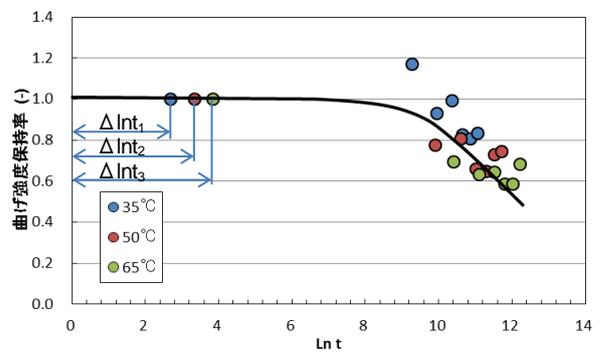


図11 18°C における曲げ強度の低下曲線

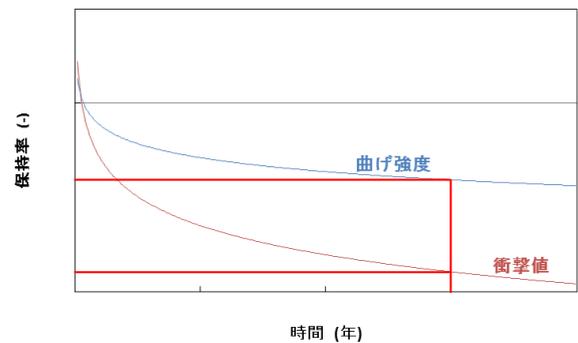


図12 18°C における力学物性値の低下曲線

7. おわりに

本報では、某半導体製造工場において、設置から約30年が経過したFRP製排ガス洗浄塔の超音波エコーによる劣化診断を試みた。また、促進試験の結果との比較、反応速度論に基づいた寿命予測を試みた。以下にこれらの結論としての知見をまとめる。

- 促進試験の結果、環境液が水である場合のFRPの劣化は主として樹脂の加水分解であり、繊維樹脂界面のはく離を生じない。これにより力学的特性は低下するが、超音波エコーは変化しないことがわかった。
- 弱アルカリ水を循環液とした洗浄塔の外観変化は、促進試験との比較からも水とほぼ同様の劣化機構と推察される。その結果、洗浄塔の超音波エコー強度は促進試験と同様に変化しないはずであるが、実際にはエコー強度が減少した。これは表面の凹凸や紫外線による劣化が少なからず影響しているためと考えられる。
- 以上のように繊維/樹脂界面にはく離を生じない劣化機構に対して、超音波エコーは適用できないことが明らかとなった。
- 反応速度論によるアレニウス則を適用した強度低下曲線を作成した結果、水暴露環境下、雰囲気温度18°Cにおける30年の使用では、曲げ強度で半分以下、衝撃値で約9割の低下が予測できた。超音波エコーが適用できずとも、促進試験データから寿命を予測できる可能性が示された。
- 促進試験データの信憑性を向上させるためには、データ点数の増加、より長期の促進試験、水と弱酸や弱アルカリとの相違点の明確化などが課題である。

参考文献

- 1) 杉本健一;超音波を用いたFRPの劣化診断事例,TEXEL技報,pp.15-19,Vol.1(2012).
- 2) 杉本健一;超音波によるFRPの劣化診断事例 第2報 廃塩酸タンクの診断事例,TEXEL技報,pp.15-20,Vol.4(2014).
- 3) 杉本健一;スクラバ循環タンクの劣化診断事例,TEXEL技報,pp.17-20,Vol.6(2015).
- 4) 杉本健一;洗浄塔の劣化診断事例紹介,TEXEL技報,pp.15-20,Vol.7(2016).