

経済産業省  
脱炭素成長型経済構造移行推進審議官賞  
「大型磁気浮上式高速単段  
ターボブロワ (MAG ターボ/M55 型)」  
川崎重工株式会社

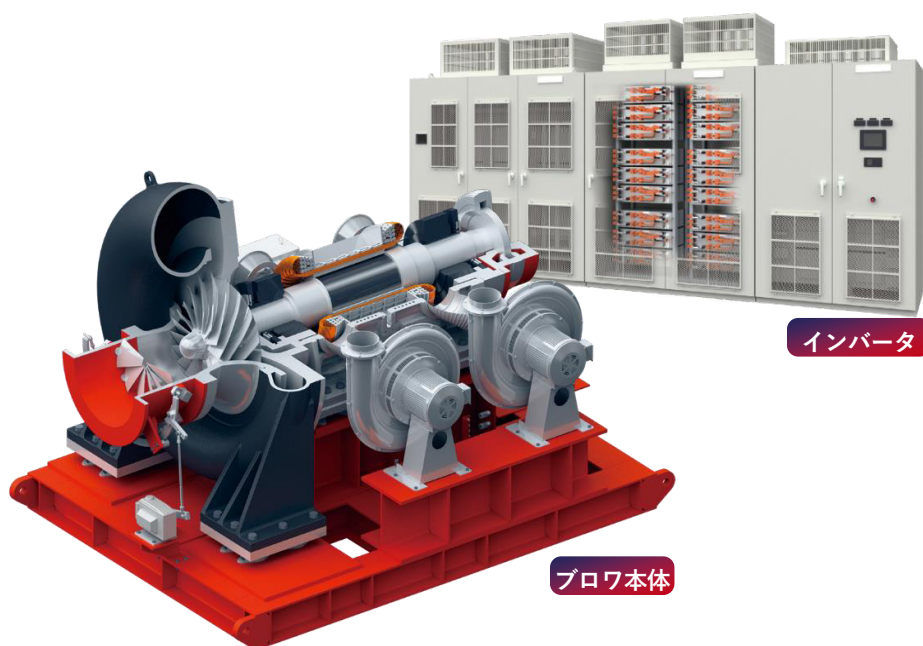
## 1. 装置の詳細説明

### (1) はじめに

下水曝気ブロワとは、下水処理施設において曝気槽（生物反応槽）へ空気を供給するブロワ（送風機）である。曝気槽では下水曝気ブロワから吹き込まれた空気が微生物の働きを促し、下水中に含まれる汚濁物質を微生物に付着させて、沈みやすい汚泥に変えている。

全国の下水処理施設では、国内で消費される電力の約 0.8%（約 7,500 百万 kWh/年）とかなり大きな電力が消費されている。その下水処理施設の中で最も多くの電力を消費する機器が下水曝気ブロワであり、その電力消費量は同施設全体の約 50% を占めている。すなわち日本の電力量の約 0.4%（約 3,750 百万 kWh/年）が下水曝気ブロワで消費されている。

そのため、下水曝気ブロワに対して、脱炭素・グリーン社会の実現に向けた高効率化・省エネルギー化のニーズが年々高まっており、そのニーズの高まりに応えるための製品が、この度、下水曝気ブロワとして国内に初めて納入した磁気浮上式高速単段ターボブロワ「MAG ターボ」シリーズの最大機種「MAG-M55 型」である（図表 1）。



図表 1 MAG-M55 型

## (2) MAG ターボの特徴

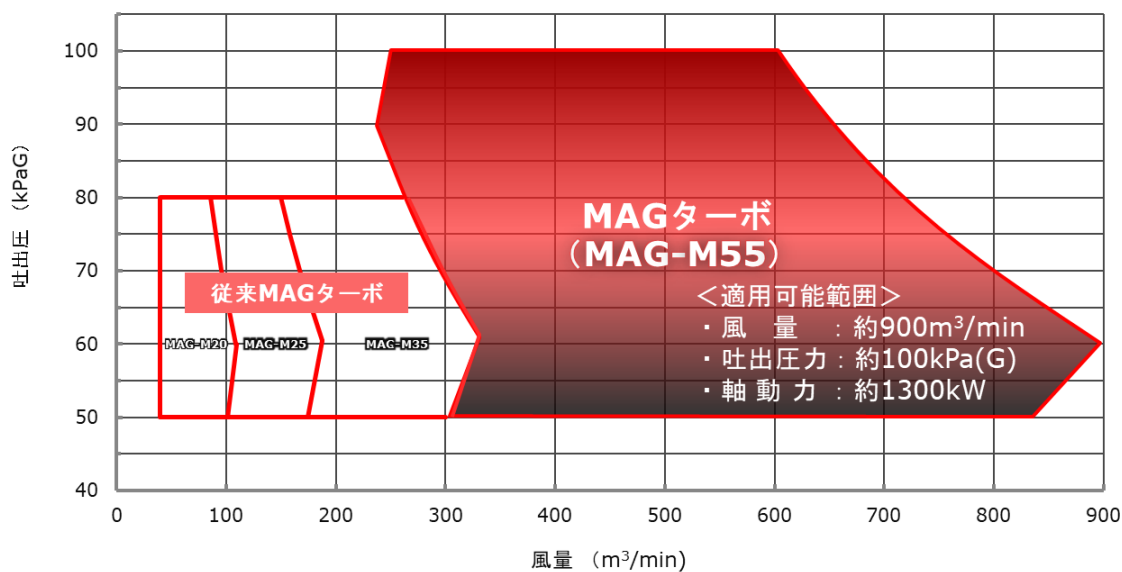
MAG ターボの最大の特徴は、インバータ制御式高速電動機のロータ端部に羽根車を直接取り付けた構造と、電磁力によりロータを浮上させる磁気軸受を採用していることにある。ロータが軸受と機械的に接触することなく高速回転することから、高効率・省エネルギーで運用することができる。さらに、インバータによる回転速度制御とインペラ前の空気入り口にある扇型の羽根を開閉して旋回流をつくるインレットベーン制御のデュアル制御による広い風量制御範囲と高い部分負荷効率の両立、コンパクトなパッケージ化と多様なレイアウト対応、潤滑油不要など従来の下水曝気ブロワにはない新たな機能が高く評価され、2004年の初号機納入から現在に至るまで200台以上の納入実績を持つ。

過去の実績において、MAG ターボの導入により、下水処理施設の運用条件によっては最大約30%の消費電力の削減を実現した例もあり、下水曝気ブロワとして日本全国の下水処理施設から排出されるCO<sub>2</sub>の削減に貢献している。

## (3) 適用範囲の拡大と高効率化

これまでのMAG ターボの適用範囲は、風量：最大約300m<sup>3</sup>/min、モータ最大出力：約400kWであったが、今回、大規模下水処理場向けに磁気軸受型ブロワでは当社初の出力規模となるMAG-M55型を開発した。MAG-M55型の適用範囲は、風量：最大約900m<sup>3</sup>/min、モータ最大出力：約1,300kWとなり、これまでの適用範囲を大幅に拡大することが可能となった(図表2)。

MAG ターボに搭載する斜流型インペラは約半世紀前に当社が自社開発したものだが、その形状や空気流路の設計は常に最先端の技術で進化を続けている。MAG-M55型に搭載しているインペラの開発においても、CFD解析などの最新技術を駆使して設計し高効率を実現した。また、インペラ設計は案件ごとの仕様(風量、圧力)に合わせた最適設計を実施することで、様々な仕様に対して高効率運転が可能となっている。



図表2 MAG-M55型の適用範囲

加えて、インバータによる回転速度制御とインレットベーン制御のデュアル制御により、広い風量制御範囲と高い部分負荷効率の両立を実現している。

さらに、MAG-M55 型を開発する上では、電気制御システムを大幅に見直し、最大出力 1,300kW に対応するためにインバータ電圧を 3000V/6000V 系の高圧電源に対応することで、電気設備から高圧で直接電源の供給を受けることが可能となった。また、MAG-M55 型では、従来の MAG ターボの約 10 倍の質量のロータを浮上させ高速回転させる必要があるため、磁気軸受制御システムの大幅な見直しを実施した。

以上のように、MAG ターボの特徴を活かしながら適用範囲を大幅に拡大することで、大規模下水処理場への納入を目指している。

## 2. 開発経緯

### (1) 開発経緯

日本国内は国土が狭いために分散された中小型の下水処理場が主流ではあるが、海外では大都市の処理を一括して行う大規模下水処理場が数多く存在している。国内外を問わず脱炭素・グリーン社会の実現に向けた高効率化・省エネルギー化のニーズが年々高まっており、大規模下水処理場への納入を目指し MAG-M55 型の開発を行った。

以下に開発経緯を示す。

2016 年度～2017 年度	要素技術開発、機器設計
2017 年度～2018 年度	試験機製作、工場試験
2019 年度～2020 年度	実証設備にて試験運転
2021 年度	第 1 号機納入

### (2) 共同開発

本装置は、川崎重工業株式会社、株式会社明電舎が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は次のとおり。

- ・川崎重工業株式会社：  
磁気軸受システム開発、空力部品（インペラ・渦巻ケーシング等）開発
- ・株式会社明電舎：  
ドライブシステム（電動機・インバータ）開発

### (3) 技術導入

なし

### 3. 独創性

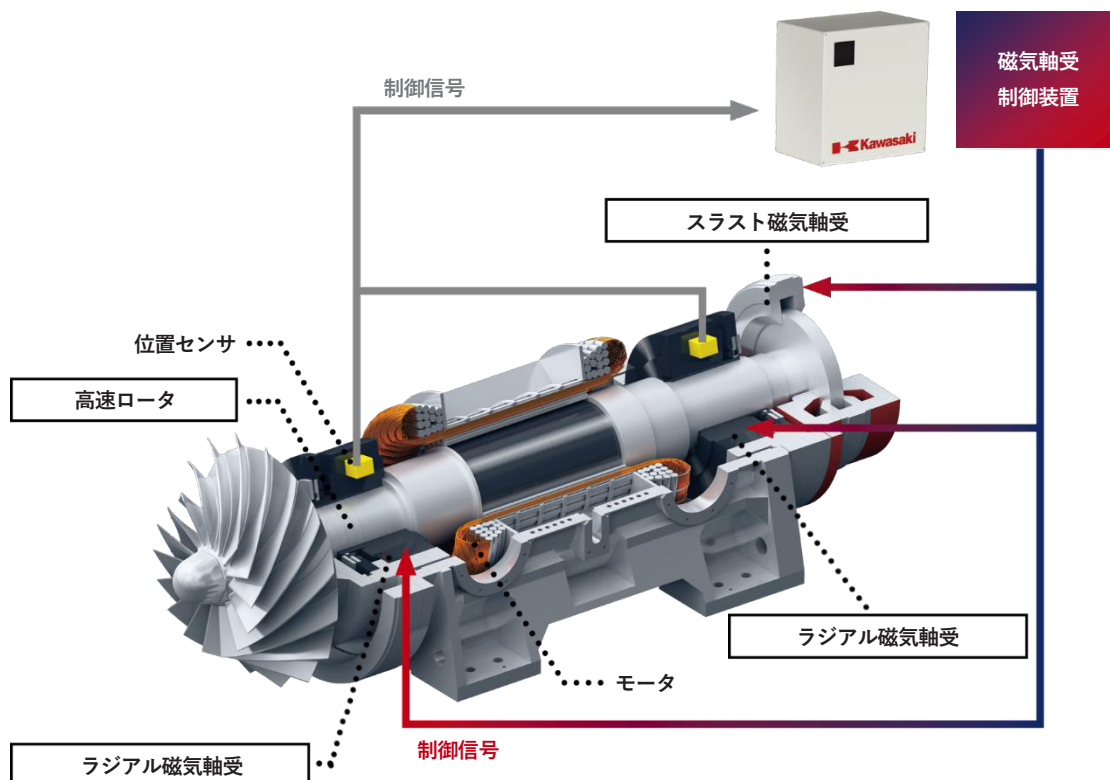
#### (1) 大型磁気軸受の開発

下水曝気ブロワは、最大約 30,000rpm の高速回転を必要とするターボブロワであり、従来のブロワは高速回転を実現するために、増速歯車や潤滑油システムを要する軸受など多数の機械部品を必要とした。そこで、これらの機械部品をなくして、非接触式の軸受を実現することができれば、従来のブロワを効率面・運用面で凌駕する革新的なブロワが成立すると考え、これを実現化するために採用したシステムが磁気軸受である。

磁気軸受は、ロータを電磁石の磁力により浮上させる機械的非接触の軸受であり、機械的な接触がないため潤滑油やグリースが不要であり、回転エネルギーをロスなくロータに伝えることができることから高効率を実現している。

MAG-M55 型では、従来の MAG ターボの約 10 倍の質量のロータを浮上させ高速回転させる必要があるため、磁気軸受制御システムを大幅に見直し大型磁気軸受を開発した。磁気軸受及び磁気軸受制御システムをブロワの製造メーカーである川崎重工業が開発製造することで、ブロワの特性に応じた安定した磁気軸受制御を実現している。

磁気軸受制御システムは、図表 3 に示すように、位置センサ及び磁気軸受（電磁石）、磁気軸受制御装置から構成される。位置センサは、ロータの両端のステータ側に設置されてラジアル方向、スラスト方向のロータ変位を検出する。位置センサで検出したロータ変位を磁気軸受制御装置にフィードバックし、磁気軸受に発生する吸引力を調整することにより、ロータを所定の位置に維持することができる。



図表 3 磁気軸受制御システム

<磁気軸受を採用するメリット>

1) 機械的非接触

機械的接触が無いことにより、高速回転を可能にするとともに、摩擦損失が少ないため、機械の高効率化が図れる。

2) 能動制御可能

電氣的な能動制御を行なうことができるため、ロータ振動を極めて低いレベルに抑制できるとともに、外乱に対してロータ位置を制御する能力にも優れている。また、運転状態を外部から監視・記録することができるなど、セルフモニタリング機能を有しており、高い信頼性を実現している。

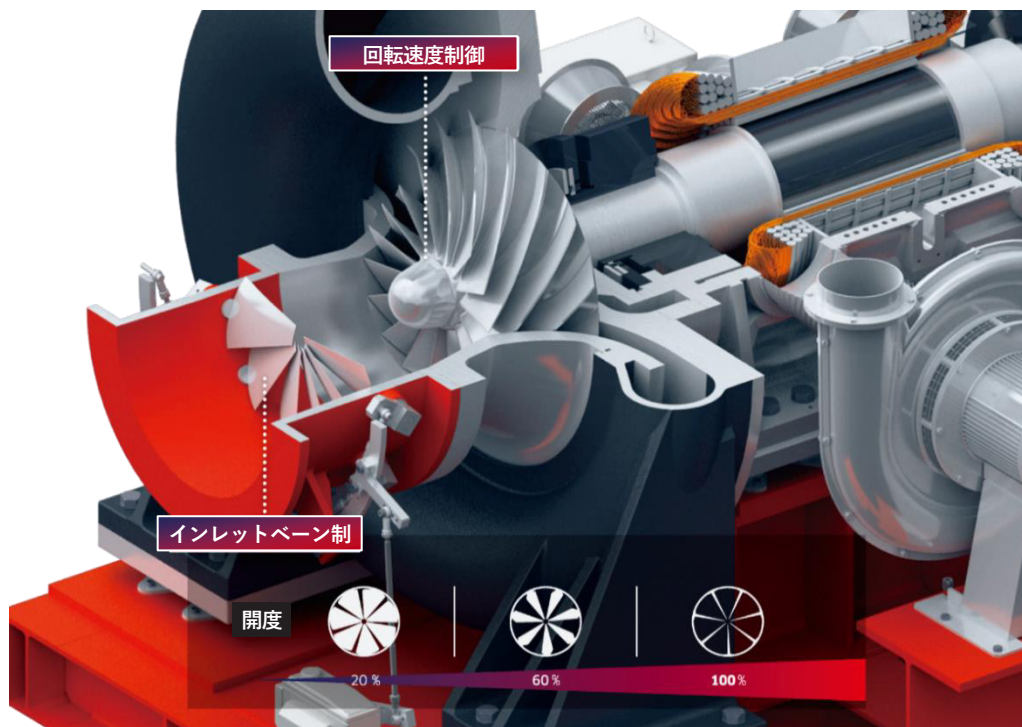
3) オイルフリー

磁気軸受を採用したブロワは、潤滑油やグリースが不要である。また潤滑油系統の補機類も不要となるため、システムの簡素化が図れ、メンテナンス作業を大幅に軽減することができる。

(2) 回転速度制御とインレットベーン制御のデュアル制御を大型機に採用

従来装置の多くは、回転速度は一定とし、インレットベーン制御のみで風量制御されている。一般にインレットベーンによる風量制御は部分負荷効率が良いとされているが、理論的に少風量側で昇圧能力が低下するため風量制御範囲が狭くなる。設計点をずらすことにより風量制御範囲を広くすることは可能だが、通常運転領域の効率が悪化する。

一方、本装置は、インレットベーン制御に加えてインバータによる回転速度制御により、回転速度を任意に変更することが可能である(図表4)。通常運転領域の効率を悪化させることな



図表4 回転速度制御とインレットベーン制御



く、インレットベーン制御における少風量側の昇圧能力の低下を回転速度を上昇させることで補い、広い風量制御範囲を確保している。またインレットベーン制御と回転速度制御を併用することによって高い部分負荷効率を実現しており、下水曝気ブロウとして要求される流入下水量の経年変化や季節、昼夜の変動に対しても効率良く運転をすることができる。

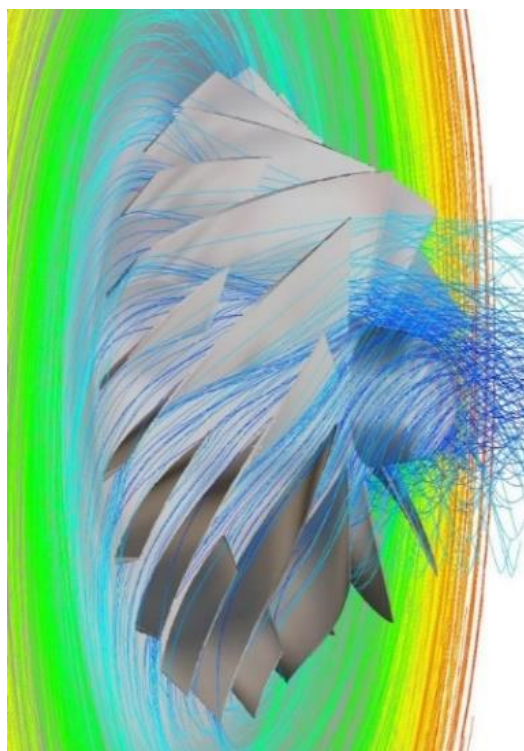
### (3) 大型高効率インペラの開発及びインペラ形状の最適化

当社は、1959～1964年にかけて、斜流形インペラを搭載した歯車増速式単段ブロウを自社開発し、下水曝気ブロウとして最初に市場に投入した。インペラの形状や空気流路の設計は、その後も常に最先端の技術で進化し続けており、MAG-M55型においてもCFD解析(図表5)と遺伝的アルゴリズムを駆使した最適な形状探索により大型高効率インペラの開発を行った。

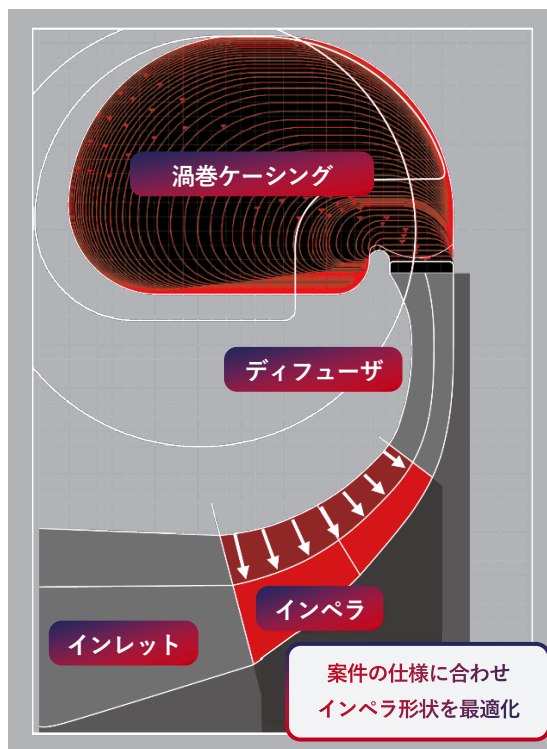
またインペラ設計は案件ごとの仕様(風量、圧力)に合わせ、流路形状を最適設計することで、様々な仕様に対して高効率運転が可能となっている(図表6)。

### (4) 大型高性能高速ドライブシステムの開発

MAG-M55型を開発する上で、最大出力1,300kWに対応するためにインバータ電圧を3000V/6000V系の高圧電源に対応し、電気設備から高圧で直接電源を供給するなど、大幅なドライブシステムの見直しが必要になった。MAGターボの最大の特徴は高い効率性能であるが、MAG-M55型においても効率性能に妥協することなく大型高性能高速ドライブシステムの開発に成功した。



図表5 CFD解析



図表6 インペラ形状の最適化

### 1) 大型高効率モータ

MAG-M55 型でも、従来の MAG ターボと同様に PM モータ(永久磁石同期電動機)を採用した。図表 7 に従来装置で多く採用される誘導電動機と PM モータの断面形状を示す。誘導電動機は誘導電流が生じることで発生する回転磁界の力でロータを回転させるが、PM モータはモータコイルに流した電流によって生じる回転磁界とロータ表面の永久磁石の磁力によってロータを回転させるため、誘導電流が発生せず、誘導電動機と比較して高効率である。

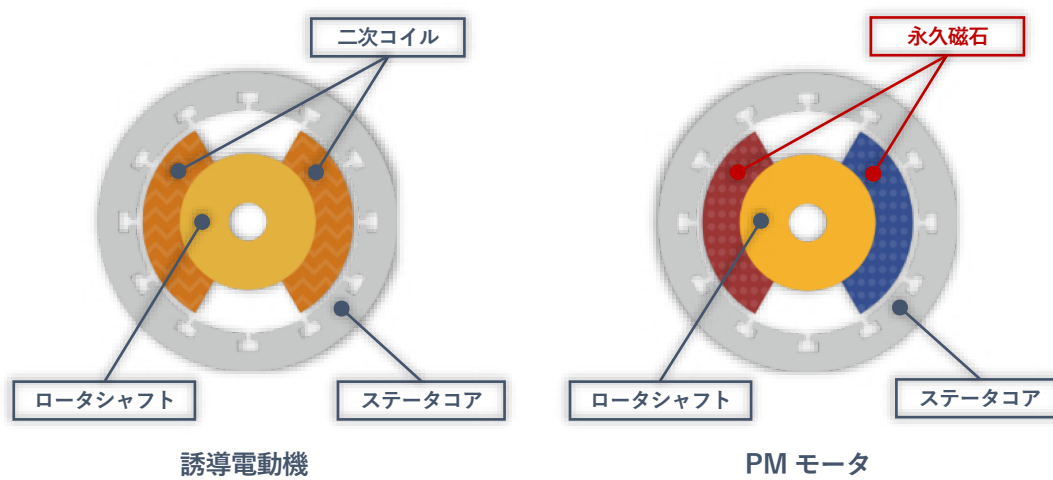
### 2) 高電圧高効率インバータ

本インバータはマルチレベル PWM 方式 (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) を採用し、3,000~10,000V 級の高圧受電に対応可能である。マルチレベル PWM 制御では、インバータの上流側に入力トランスが設置されており、下流側の各インバータセルに電圧を供給している。インバータの部分には、18 個のインバータセルがスター結線で設置されており、それぞれのインバータセルは約 635V の電圧を分担している。この回路構成によって、6,600V の高電圧を直接モータへ出力することが可能になっている ( $635V \times 6 \text{ 個} \times \sqrt{3} = 6,600 \text{ V}$ ) (図表 8)。

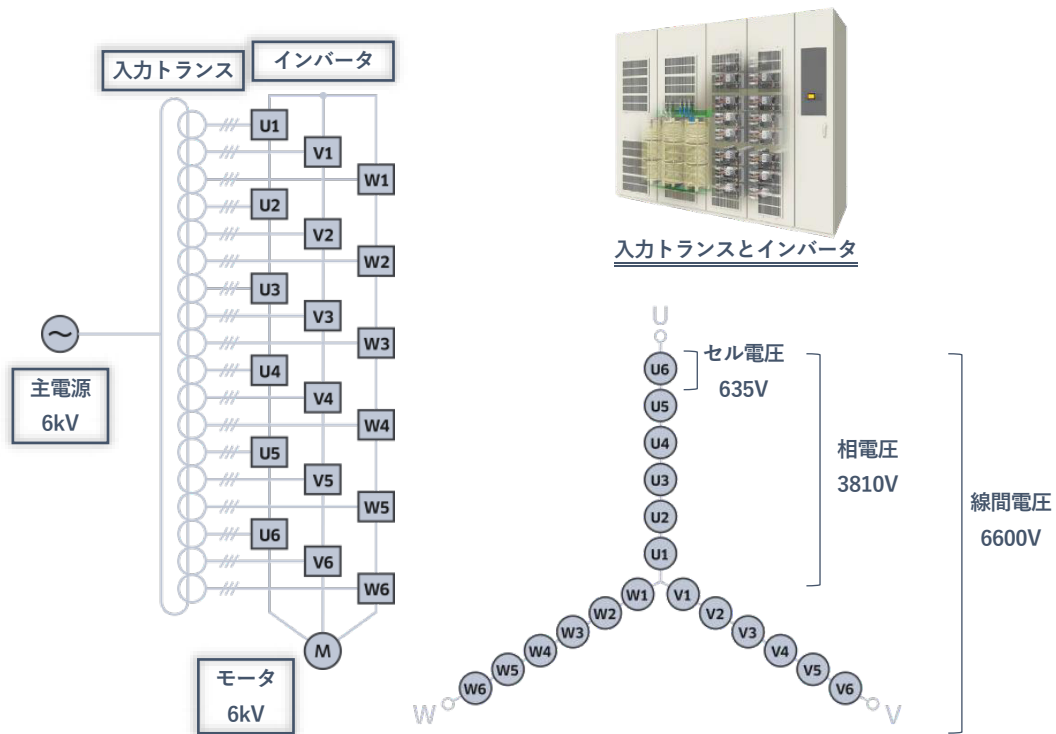
マルチレベル PWM 方式を採用したことで、出力トランスが不要になり、インバータ効率は入力トランスを含めても 97% という高い効率を達成することができた。

### 3) そのほかの特徴

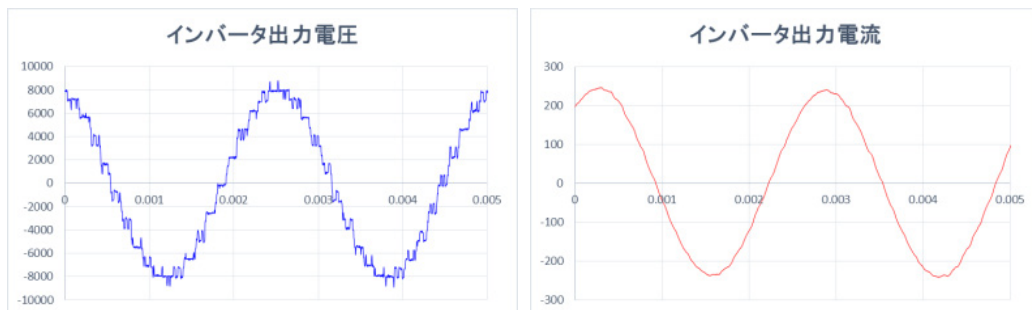
- ・電源供給ラインへの高調波抑制  
入力トランスを介した多相整流により、電源ラインへの高調波を大幅に低減している。
- ・歪みの少ない電圧、電流波形の実現  
マルチレベル PWM 方式を採用することで歪みの少ない電圧、電流波形を実現した (図表 9)。
- ・高力率  
進相コンデンサなどの力率改善機器を必要としない高い力率を実現。
- ・容易なメンテナンス  
インバータセル、制御装置はユニット方式であり、短時間で交換が可能である。



図表 7 誘導電動機及び PM モータの断面図



図表 8 マルチレベル PWM



図表 9 インバータ出力波形

(5) 大容量高効率送風機による集約設置

従来、中・大規模下水処理場においては、中容量の送風機（直結式多段ターボブロワや歯車増速式単段ターボブロワ）を複数台設置し、運転台数の発停管理により送風機運転を行ってきたが、この方式では、送風機を複数台設置するため、消費電力量や維持管理労力が大きくなりやすいという課題があった。

MAG-M55 型のように大容量で高効率な送風機を少数台集約設置することにより、消費電力量及び維持管理労力の削減が可能となる。

なお、上記（1）～（3）は従来 MAG ターボ（小・中型機）で得た知見を活用した開発要素であり、（4）、（5）は MAG-M55 型（大型機）の開発における新規要素である。



#### 4. 特許の有無

次のとおり、特許2件を取得済み。

特許番号：第5192271号 / 名称：磁気軸受装置

特許番号：第6316270号 / 名称：送風機の制御方法

#### 5. 性能

(1) 従来装置から本装置への置き換えによる効果（約4.2%の消費電力量削減）

海外のある大規模下水処理場をターゲットとして、従来装置（歯車増速式ブロワ）との性能比較を行った。計算条件は図表10及び図表11、図表12のとおりである。1日のうち大風量・中風量・小風量で8時間ずつ運転を行うと仮定し、季節の温度変化も考慮する。

この計算条件に基づき、1年間の合計消費電力量及び平均電力を算出した結果、従来装置から本装置に置き換えることにより、約4.2%の消費電力量の削減効果が確認された（図表13）。

(2) 集約設置の効果（約11%の消費電力量削減）

福岡県内の下水処理場において、既設機（従来装置）である鋳鉄製多段ターボブロワ全6台のうち、360m<sup>3</sup>/min×2台を、実証機（本装置、高速軸浮上式ターボブロワ）720m<sup>3</sup>/min×1台に集約して約1年間運用し（図表14、図表15）、省エネルギー効果を確認した。なお、実証期間中は実証機を主機、既設機を風量不足分補うための補機として運転を行った。

実施期間中の運転結果に基づき、実証機1台に集約する場合と既設機で複数台運転する場合の消費電力量を試算した結果、大容量高効率送風機に集約することにより、約11%の消費電力量の削減効果が確認された（図表16）。

図表10 年間平均温度

項目	期間（各4ヵ月）		
	夏（5～8月）	春（3～4月）、秋（9～10月）	冬（1～2月、11～12月）
平均気温	25℃	13℃	1℃

図表11 仕様条件

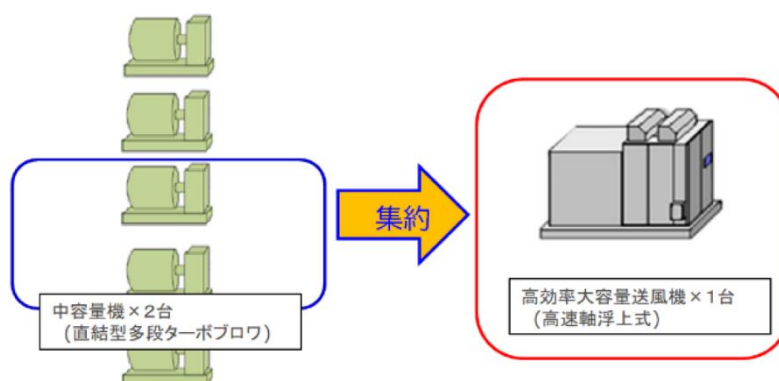
項目	仕様条件
湿度	60%
大気圧力	99.8 kPa(A)
吸込圧力	-0.5 kPa(G)
吐出圧力	80.2 kPa(G)
最大吸込風量（100%風量）	748 m <sup>3</sup> /min

図表12 1日の運用パターン

項目	大風量	中風量	小風量
吸込風量	90%	72.5%	55%
運転時間	8時間	8時間	8時間

図表 13 従来装置との性能比較

項目		本装置 (MAG-M55)			従来装置(歯車増速式ブロワ)		
		夏 25℃	春、秋 13℃	冬 1℃	夏 25℃	春、秋 13℃	冬 1℃
各風量での電力	大風量	970 kW	918 kW	875 kW	1,000 kW	957 kW	928 kW
	中風量	791 kW	754 kW	722 kW	817 kW	784 kW	765 kW
	小風量	639 kW	610 kW	585 kW	659 kW	635 kW	618 kW
平均電力		763 kW			796 kW		
1年間の合計消費電力量		6,680,196 kWh/年			6,971,175 kWh/年		
消費電力量差		▲290,979 kWh/年 (約4.2%の消費電力量の削減効果)			—		



図表 14 集約設置のイメージ

図表 15 実験概要

項目		実験概要
試験場所		福岡県 御笠川浄化センター
実証期間		2019年11月30日～2020年11月6日 (運転時間 8,052 時間)
機器諸元	実証機 (本装置)	型式：MAG-M55 機種：高速軸浮上式ターボブロワ 720m <sup>3</sup> /min×63.7kPa …… 1台
	既設機 (従来装置)	機種：鋳鉄製多段ターボブロワ 240m <sup>3</sup> /min×63.7kPa …… 3台 360m <sup>3</sup> /min×63.7kPa …… 3台

図表 16 実証機と既設機の消費電力量の比較

項目	実証機 (本装置)	既設機 (従来装置)	備考
日送気風量 (年間平均)	901,768 m <sup>3</sup> /日	516,411 m <sup>3</sup> /日	合計 1,418,179m <sup>3</sup> /日
各機種のみで 1年間運転した場合の 年間消費電力量 (計算値)	9,993,729 kWh/年	11,198,891 kWh/年	1年間の送気を実証機又は既設機 のみで行った場合の消費電力量
風量原単位※ (年間平均)	0.0193 kWh/m <sup>3</sup>	0.0216 kWh/m <sup>3</sup>	既設機と実証機の配管フローの違 いによる吐出圧力差から発生する 動力差を補正
消費電力量差	▲1,205,162 kWh/年	—	約 11%の消費電力量の削減効果

※風量原単位：(各機種が1日に消費した電力量 [kWh] ) ÷ 1日に送気した風量 [m<sup>3</sup>]

## 6. 経済性

5.(1)項に記載した従来装置と本装置とのイニシャルコストとランニングコストを比較する(図表17)。年間ランニングコストを7%削減したことにより、約9年でイニシャルコストの増加分を回収できる。

## 7. 将来性

国内外を問わず、環境負荷低減を求められる中で施設の老朽化は深刻化しており、高効率な装置の導入による消費電力量削減は世界共通の喫緊の課題である。本装置はこの課題に対する1つのソリューションであり、今後、国内外の大規模下水処理場への展開が十分に期待できる。

図表 17 イニシャルコストとランニングコスト比較表※

項目	従来装置 (歯車増速式ブロワ)	本装置 (MAG-M55型)
イニシャルコスト	100	110
装置費用	100	118
設置費用	100	95
ランニングコスト	100	93
電気代	100	96
メンテナンス費用	100	79

※従来装置のイニシャルコスト、ランニングコストを100とした相対値