

3D インペラ搭載マグネットポンプの開発と納入事例

技術開発研究所

1. はじめに

パリ協定 COP21 の発効（2016 年）以降、省エネルギーは、化石燃料枯渇の対策として有効にエネルギーを利用するだけでなく、地球温暖化ガス（すなわち二酸化炭素）の排出を削減し地球温暖化への対策として重要性が高まっている。また、今後の AI 発展による電力増にも対応が求められ、現在、再生エネルギーの利用、高効率機器の導入、エネルギー管理システムの活用などがエネルギー消費を抑制し環境負荷低減が進んでいる。ポンプや送風機の回転機械の分野では、高効率電動機の導入やインバータ制御技術を活用し電動機の回転数を最適化することで無駄なエネルギーの抑制や二酸化炭素排出、コストの抑制につながっている。

当社では、ポンプ・送風機の内部の流れの最適化と損失の低減を行うことによる省エネルギー化を試みている。本報では、大容量、低揚程（高比速度）に対して高効率・高吸込み性能を有する 3D インペラを搭載した耐蝕マグネットポンプの開発及び納入事例について述べる。

2. 3D インペラの概要

3D インペラとは、ブレードが単純な 2 次元曲面(XY 軸)で構成される従来の形状に加えて、空間的 (Z 軸方向) にも湾曲している形状を持つインペラである。

従来の手法では、回転数、揚程、流量から算出できる比速度を基準として、インペラ径、マウス径、入口角度、出口角度、入口高さおよび出口高さなど各種パラメータを線図より求めて決定するが、3D インペラでは、ブレード形状をモデリングし、数値流体解析を用いて流れのシミュレーションを行い形状の調整を行い最適化する。図 1 に 3D インペラ外観を示す。ブレードが Z 軸方向にも傾いているため、図 2 のようにインペラの主板側、側板側のブレード投影断面は重ならない。

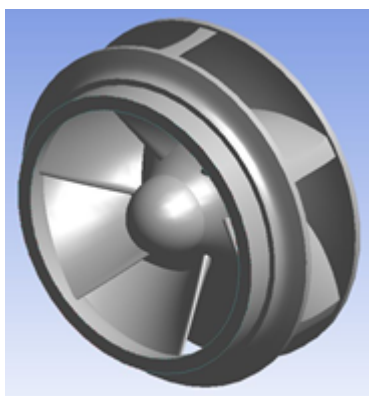


図 1 3D インペラ外観

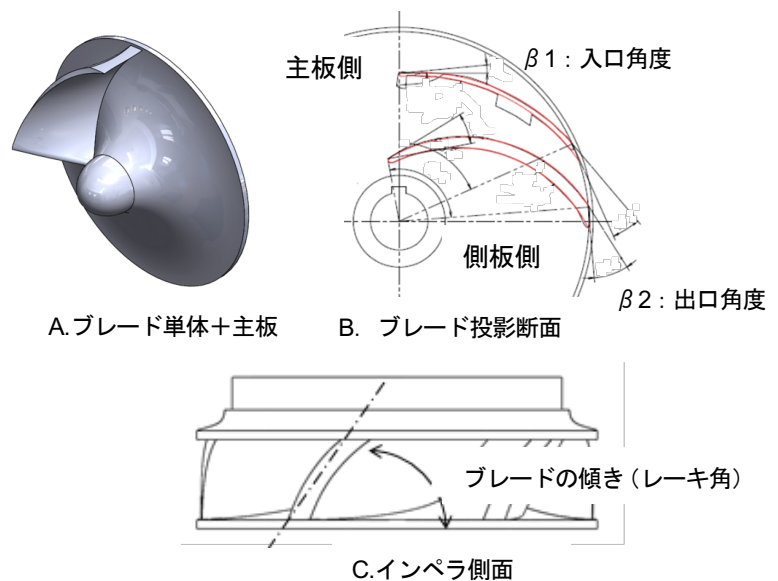


図 2 インペラ概略図

3D インペラの最大の特徴は、ブレード形状がZ軸方向にも最適化されているため、流路の滑らかさや渦の発生を抑制できる点にあり、ポンプ全体の効率が向上し、キャビテーション耐性や吸込み性能の強化にも寄与する。

3. ケーシング

ポンプ効率は、インペラとケーシングとのマッチングにも大きく影響される。樹脂製のマグネットポンプにおいては、ケーシングの断面形状として矩形が広く採用されているが、さらなる効率向上を目指すため、円形、楕円および台形など多様な断面形状の採用を検討した。

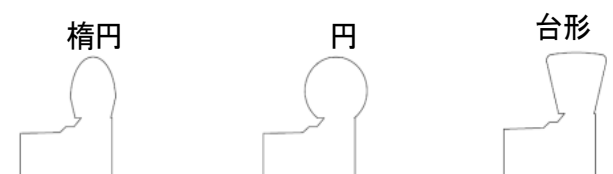


図3 ケーシング渦室断面形状

これらの代表的形状を図3に示す。これら複数の断面形状の渦室を有するケーシングについて数値流体解析を実施したが、その結果、現時点では円形断面のケーシングが最も高い効率を示した。

ただし、現状では楕円や台形の断面について十分な形状最適化がなされていないため、今後の更なる検討によっては円形断面を上回る効率特性が得られる可能性も考えられる。

4. モデリングと性能解析

ブレード形状モデリングは、ANSYS 社の商用ポンプ設計ツールを用いた。次に、3D CAD でインペラ形状、ケーシング形状を作成し、解析に適したモデルに形状を簡略化、そのデータを基にメッシュと呼ばれる解析対象の形状を小さな要素に分割したもの（図4参照）を生成し、そのメッシュを基に境界条件を設定、数値流体解析CFDで内部の流れをシミュレーションし（図5）、最終的にポンプ性能曲線（流量 VS 全揚程、軸動力、効率）を予想した。インペラ形状モデリングと解析のフローを図6に示す。

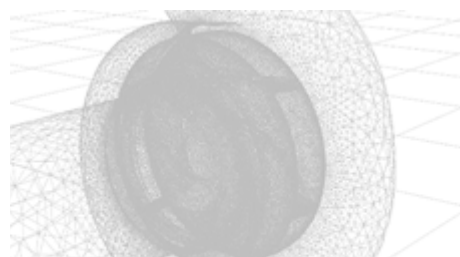


図4 解析用メッシュの例(渦室)

CFDとは、Computational Fluid Dynamicsの略で、簡単に言うと物理モデルと境界条件を与えて、ナビエ・ストークス方程式を解き、数値解を得るものである。近年はCFDソフトウェア自体の進化やワークステーション（パーソナルコンピュータより高性能な業務用コンピュータ）の性能向上により、実用的な計算時間で性能予測が可能になっている。

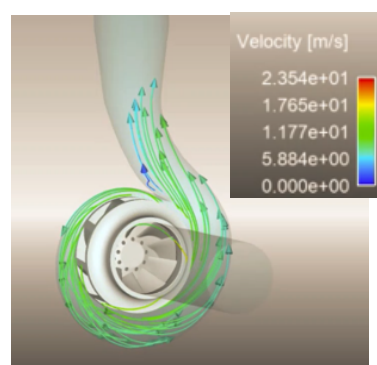


図5 内部流れのシミュレーション例

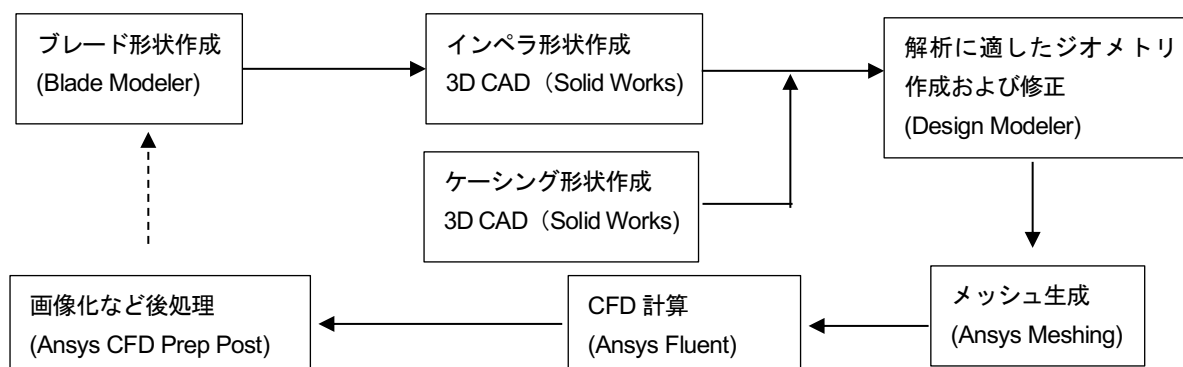


図6 インペラ形状モデリングと解析のフロー（ ）内は使用ソフト

多様な形状モデルの解析作業を繰り返しその結果を比較することにより、形状の最適化を進めることができる。商用ポンプ設計ツールと CFD により最適化したインペラ、ケーシング形状では、80%以上のポンプ効率が得られた。

5. 3D プリンタ造形による試作機

解析結果を確認するため、ポンプ効率が良いであった数種のインペラと円形・楕円・台形 3 種のケーシング形状を 3D プリンタで造形した。材質は、ナイロン 66 を主成分とするエンジニアプラスチックで、3D プリンタで出力されたインペラには表面に凹凸があり性能に影響を及ぼしたため、サンドペーパーで表面を研磨した。図 7,8 にそれぞれ 3D プリンタ造形インペラとケーシング外観と組立後の試作機を示す。試作機の仕様は、口径 100A×80A、流量 1500L/min、揚程 15~20m、回転数 2900min⁻¹である。



図 7 3D プリンタ造形インペラ・円形ケーシング外観写真

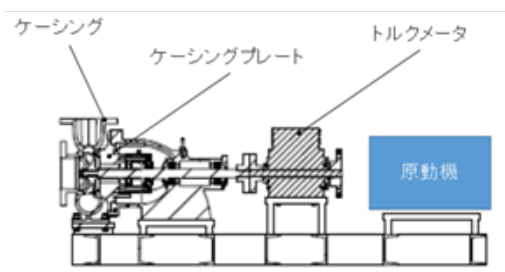


図 8

モータの動力は、モータテストレポートの入力電圧と効率の関係から計算値として求めるが、今回の測定では、動力・効率を精密に測定するため、直接的にモータのトルクと回転数が測定可能なトルクメータをモータとインペラの間に設置した。

図 9 に 3D プリンタ造形試作機の性能測定結果を示す。最適形状の効率は、解析と同様に最高効率点で 80%程度を示し、当社の口径 100A の他機種に比べても良好であった。

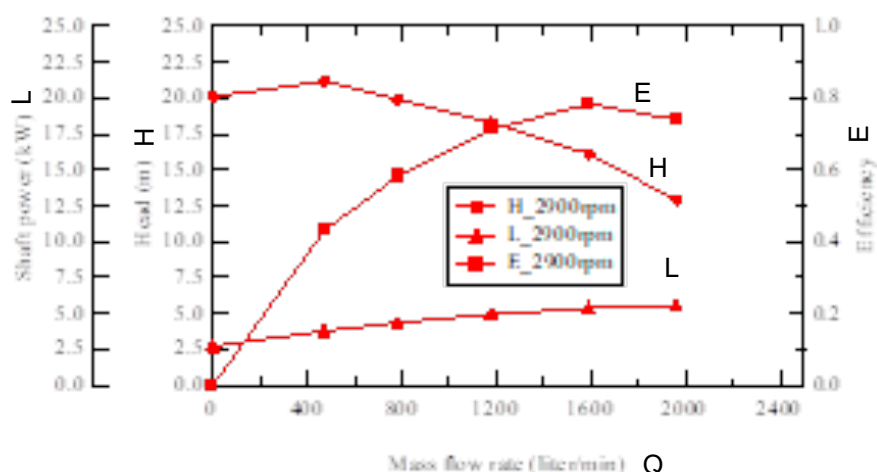


図 9 3D プリンタ造形試作機の性能測定結果(2900min⁻¹)
Q: 流量(L/min) H: 全揚程(m) L: 軸動力(kW) E: 効率(—)

また、吸込性能を示す吸込比速度は、他機種が 1100 以下であるのに対し 1300 程度あり最も吸込性能が優れていることがわかった。ちなみに吸込比速度とは、以下の式にて定義され、数値が高いほどキャビテーションを起こしにくい。

$$S = N \cdot Q^{0.5} / (\text{NPSH}_{\text{re}})^{0.75}$$

ただし、S：吸込比速度、N：ポンプ回転数(min^{-1})、Q：BEP(最高効率点)の流量(m^3/min)、NPSH_{re}：必要吸込ヘッド(m)

6. 3D インペラ搭載マグネットポンプ試作機の製作と妥当性確認

最適形状のインペラ・ケーシングを製作し、当社のマグネットポンプ代表的機種である MET-050 形の主要部品を流用して主軸回転型シールレス構造の試作機を製作した。インペラは PVDF ブロック材から切削加工し(図 10)、同様に切削加工した側板を溶接接合、ケーシングは FCD450 の鋳物内面に ETFE を回転成形することにより製作した。

図 11、12 にそれぞれ 3D インペラ搭載マグネットポンプ試作機の外観写真と内部構造写真(展示用カットサンプル)を示す。

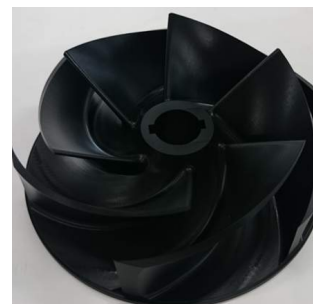


図 10 切削加工インペラ
(側板接合前)



図 11 3D インペラ搭載マグネットポンプ試作機
(100A×80A) 外観

ケーシング：FCD450+ETFE ライニング
インペラ：PVDF(切削加工)
ベアリングプレート：PVDF(切削加工)
リアケーシング：PFA+エンブラ

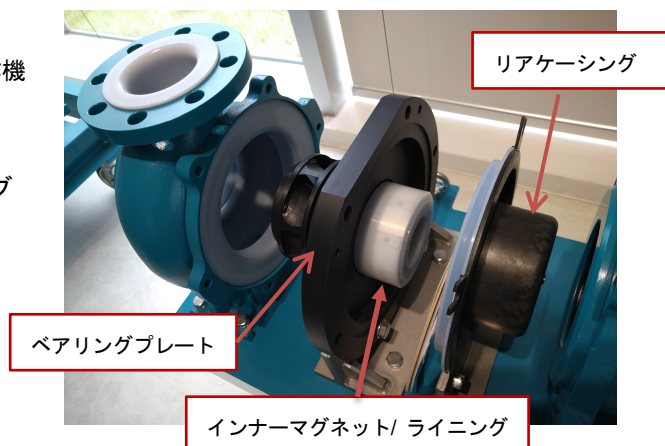
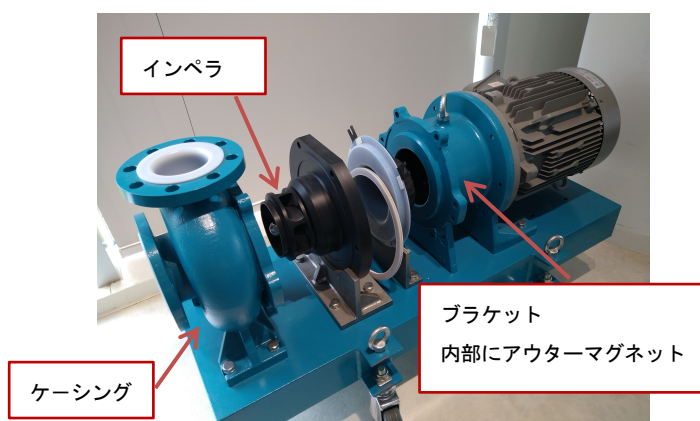


図 12 3D インペラ搭載マグネットポンプ
試作機の内部構造

本試作機の性能は、3D プリンタ造形試作機と比較して効率は、(ケーシングの形状に多少の差があったため)若干低下したが、75%(最高効率点)と当社既存口径 100A 機種と比べ 8%pt 高く、高効率であることが確認できた(図 13)。また、吸い込み性能を表す NPSH₃(揚程 3%効果時の NPSH_{re} の表記)も当社既存口径 100A 機種に比べ良好であった(図 14)。

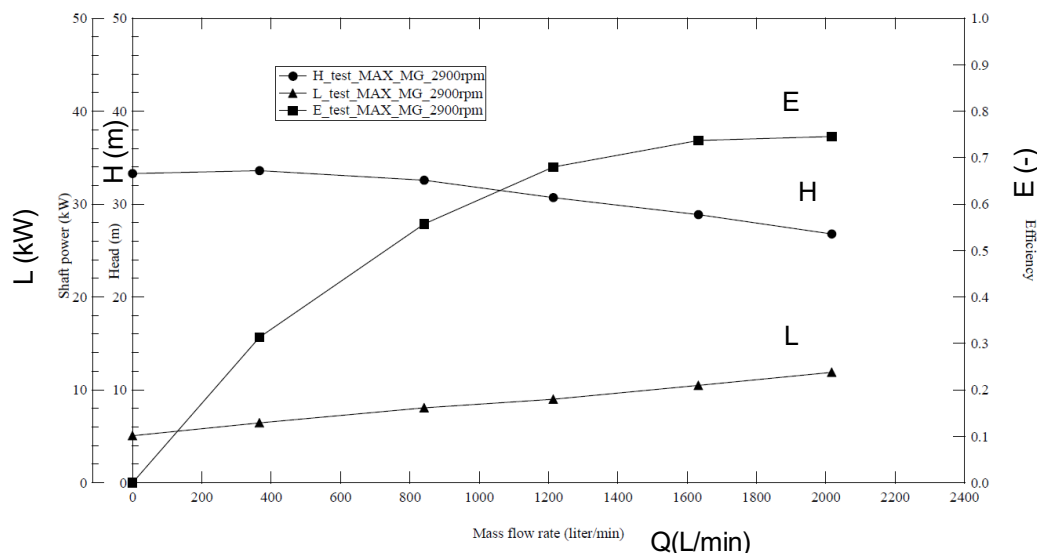


図 13 3D インペラ搭載マグネットポンプ
試作機の性能(最大インペラ径)
Q : 流量(L/min) H : 全揚程(m) L : 軸動力(kW) E : 効率(—)

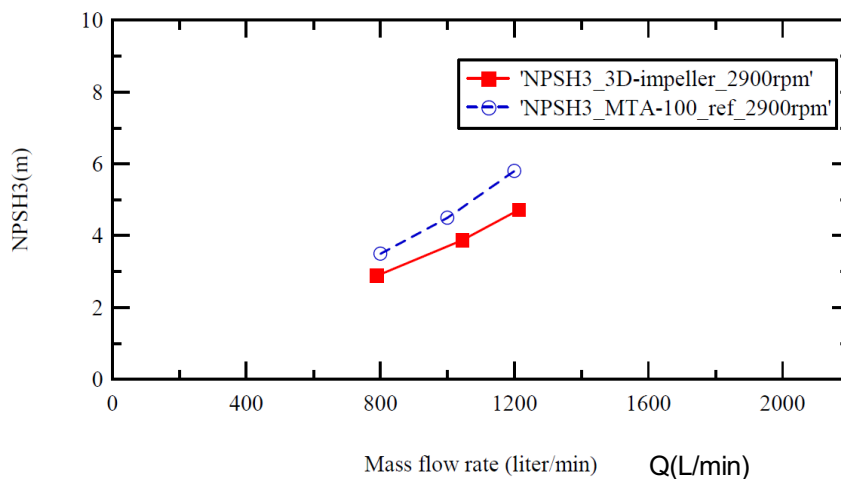


図 14 3D インペラ搭載マグネットポンプ
試作機の NPSH₃

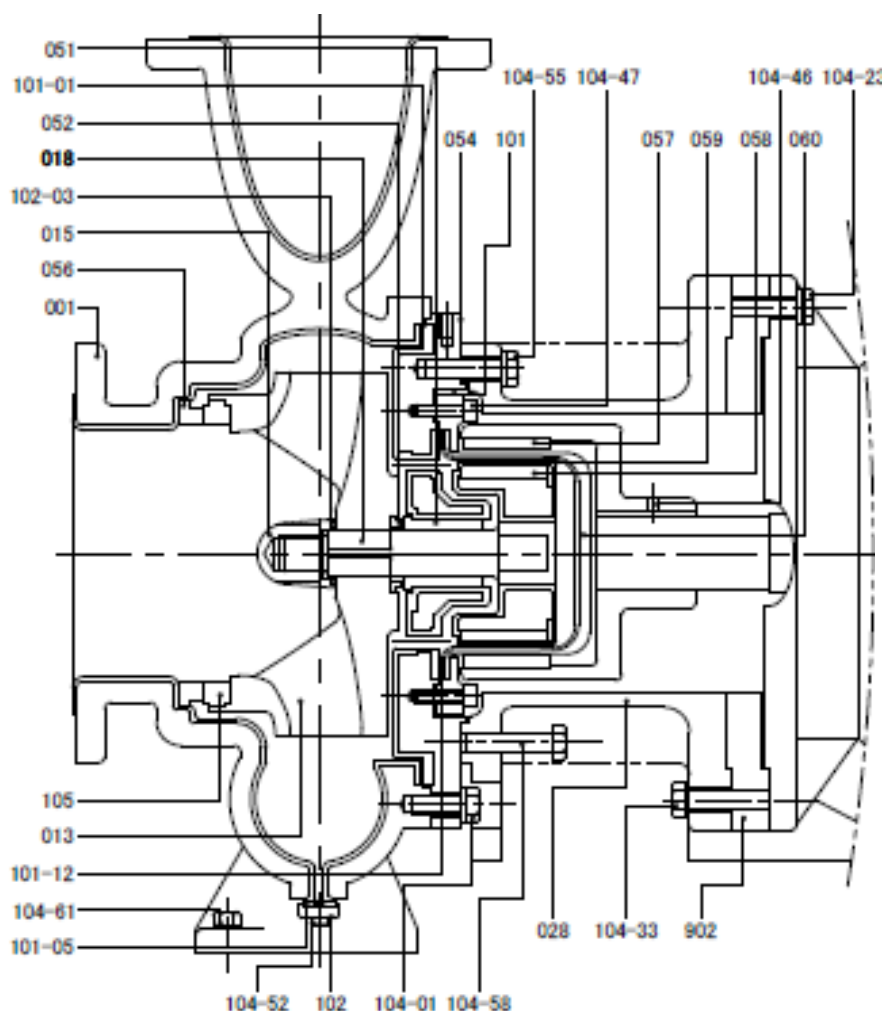
7. 実機納入

某素材製造メーカーから吸収塔の循環用として高比速度(大流量・低揚程)ポンプの引き合いがあり、既存製品であれば当社機種 MTA-200 選定で 2 台並列運転であったが、顧客に省エネ効果を PR し 3D インペラ搭載マグネットポンプ MTD-200 特設品での対応に決定した。特設にあたり、性能検討のほかにインペラ、主軸等の強度解析・寸法修正、ベアリング受け構造を改良した。表 1 に既存 2D 機種と今回特

設 3D 機種仕様の比較を、図 15 に 3D 機種仕様の断面構造図を示す。インペラは、試作機同様、PVDF 切削加工(側板溶接)である。

表 1 既存 2D 機種と今回 3D 機種仕様の比較

	機 種	仕 様	台数
既存 2D 機種	MTA 200	口径 200A×150A、3442L/min×20m×22kW(400V×4P)	2 台並列
今回 3D 機種	MTD 200	口径 200A×150A、6884L/min×20m×37kW(400V×4P)	1 台



No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
001	ケーシング	ETF/FCD450	056	フロントスラスト	SiC
013	インペラ	PVDF	057	アウターマグネット	ネオジム
015	インペラナット	PVDF	058	インナーマグネット	ネオジム
018	主軸	SiC	059	マグネットライニング	PFA
028	ブラケット	FC200	060	リアケーシング	PFA/C-PEEK
051	ベアリング	C-PTFE	101	リアケーシングリング	SCS13
052	リアスラストリング	SiC	105	マウスリング	C-PTFE
054	ベアリングプレート	PFA/FCD450			

図 15 3D インペラ搭載マグネットポンプ MTD200 の断面構造図

当該ポンプの性能を確認すると、効率は 73.7%と高効率を示した(図 16)。ただし、揚程が高すぎるためインバータで 46Hz 運転とした。また、吸い込み比速度も 1200 程度と良好であった。

当該ポンプは、最終検査で長期連続運転試験(図 17)をクリアし納品に至った。



図 17 長期連続運転試験

測定値 Value measured												
ポンプ Pump		揚点高差 Height Difference 1.0 m				モーター Motor (400 V)		比重換算				
回転数 Rotating Speed min ⁻¹	吐出 Delivery m	吸込 Suction m	全揚程 Total head m	周波数 Frequency Hz	吐出量 Capacity l/min	理論動力 H.P kW	効率 Eff. %	電流 Current A	入力 Input kW	軸動力 Output kW	Value Converted	
1 1387	27.4	2.8	25.6	46	0.0	0.00	0.0	38.10	12.00	11.17	12.29	
2 1372	25.7	1.0	25.7	46	2056.6	8.64	49.3	44.60	18.60	17.51	19.26	
3 1371	23.7	0.0	24.6	46	3546.5	14.26	69.0	49.30	21.80	20.66	22.73	
4 1369	19.8	-1.5	22.3	46	5243.9	19.11	72.1	56.40	27.80	26.52	29.17	
5 1368	15.3	-4.0	20.1	46	6887.3	22.62	73.7	61.80	32.10	30.69	33.76	

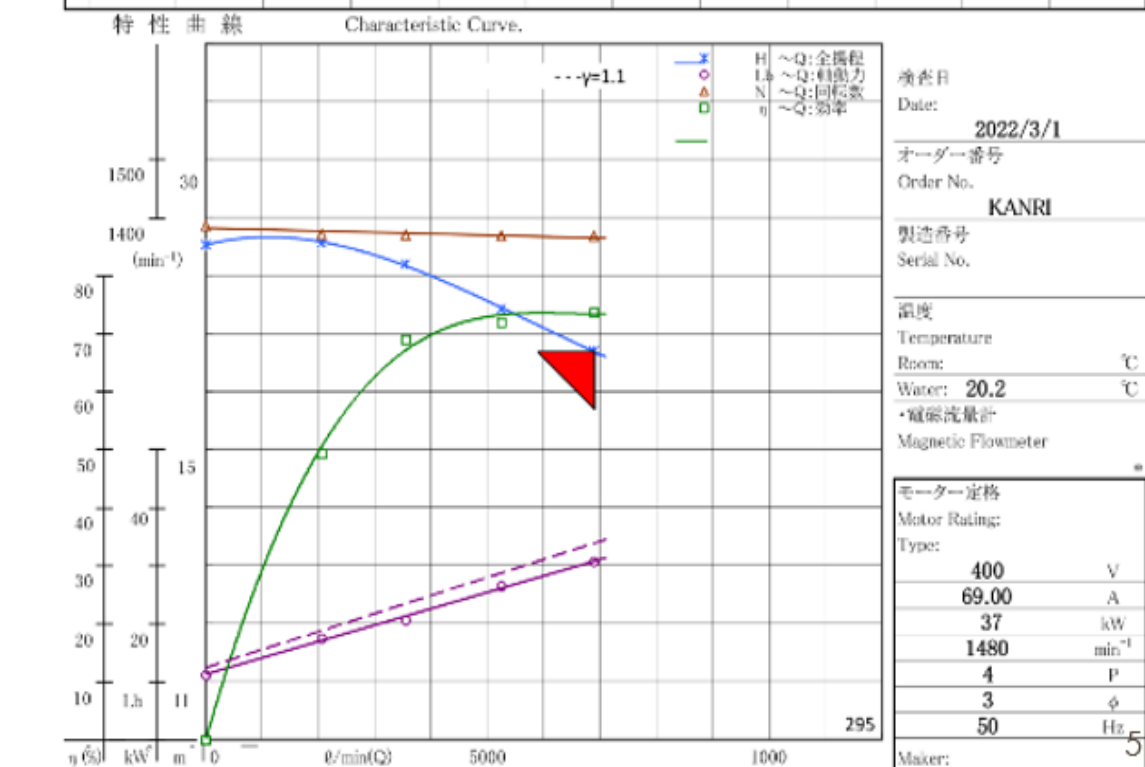


図 16 3D インペラ搭載マグネットポンプ MTD200 の性能曲線

表 2 に今回の 3D インペラ搭載マグネットポンプ導入の省エネ・CO₂削減効果(2D との比較)を示す。

当該ポンプの省エネ・CO₂削減率は、14.9%であった。当機は納入後 3 年半にわたり正常に稼働、顧客からも高評価を得て、さらに 1 台を追加納品した。

表 2 3D インペラ搭載ポンプ導入の省エネ・CO₂削減効果(2D との比較)

	ポンプ軸動力 (kW)	年間電気使用量 (kWh)	年間 CO ₂ 排出量 (ton-CO ₂)
既存 2D 機種	19.8 × 2 = 39.6	346,896	103.7
今回 3D 機種	33.7	295,212	88.3
	年間削減量	51,684	15.4
	削減率(%)	14.9	

* 運転時間 : 24h × 365day = 8760h

* CO₂ 排出量 (ton-CO₂) = 電気使用量 (kWh) × 排出係数 0.000299 (ton-CO₂/kWh)

8. さいごに

大容量、低揚程（高比速度¹⁾）の仕様に対し 3D インペラが高効率かつ高吸い込み性能であること、省エネ・CO₂削減効果が高いことをマグネットポンプで確認することができた。

量産化への課題は、PVDF の切削加工やケーシングの回転成形のコストであるが、それぞれ、PFA ロストコア成形による量産化や ETFE 回転成形の内製化によりコストダウンが可能と判断し、量産化開発を進めている。

1)高比速度

比速度は次式により計算される。

$$Ns = N \cdot Q^{0.5} / H^{0.75}$$

ただし、Ns : 比速度、N : ポンプ回転数(min⁻¹)、Q : BEP(最高効率点)の流量(m³/min)、H : 揚程(m)
 今回の 3D インペラ搭載マグネットポンプは、一般遠心ポンプの比速度が 100~300 に対し 比速度
 $Ns = 1380 \times 6.88^{0.5} / 20^{0.75} = 380$ (m³/min・m・min⁻¹) と高比速度ポンプに属する。