

中国山東省南水北調2級ダムポンプ場

山崎直樹* 日比野信也** 張洪蘭**

Two-stage Dam Pumping Station for the South-North Water Transfer Project in Shandong Province, China

by Naoki YAMAZAKI, Shinya HIBINO, & Honglan ZHANG

The on-site test operation of two-stage dam pumps with a total capacity of 150 m³/s has been completed in Phase 1 of the eastern route of the South-North Water Transfer Project in China. The pumps with a large diameter of 3000 mm feature a unique large size submersible motor connected directly to the impeller via a shaft. Since their inner casing also serves as the motor outer casing, the impeller is mounted overhung on the motor shaft. With the 52-pole synchronous motor and frequency control, the pumps offer a wide operating range to cope with water level fluctuations. The development of large size tubular pumps connected directly to motors will allow the production of pumps that deliver cost-efficient and reliable pumping in the future.

Keywords: Large size submersible, Impeller, 52-pole, Synchronous motor, Frequency control, Tubular

1. ま え が き

中国南水北調プロジェクトは、中国南方地域の水を北方地域に送り慢性的な水不足を解消するために計画された国家の大プロジェクトと位置付けられ、東線・中央線・西線がある。南水北調東線は、江蘇省揚州付近から長江の水を大運河あるいはそれと同方向の河川に沿って徐々に北に送り山東付近で立体交差させて黄河を通り、最後に天津へ送られる約1150 kmの送水計画である。

黄河付近の地勢は最も高く、黄河以北では自然流下方式によって送水し、黄河以南では水を引き揚げる必要がある(図1)。

長江から黄河の南岸までは13段に分けてポンプで水を引き揚げる必要があり総揚程は約65 mである。

南水北調東線はポンプによる引き揚げ方法を採用するが、その特徴としては低揚程(2～6 m)、大流量(15

～40 m³/s)で運転時間が長い(5000時間/年以上)。また一部のポンプは洪水時の分水機能を要求されており、ポンプの運転方式に柔軟性と効率性が求められている。

前記プロジェクトの内、2002年12月着工の東線第一期工事で2008年に当社が受注した全送水能力150 m³/sのポンプの現地試運転が2012年7月に完了した。以下に当社が納入したポンプ設備の概要と特徴について紹介する。

2. 設 備 概 要

今回納入したポンプは南水北調東線途中に位置する山東省微山湖で水を引き揚げるために建設された2級ダムポンプ場に納入された(写真1)。

本ポンプは羽根車外径3000 mmを有する大口徑チューブラポンプ5台であり、原動機はポンプ羽根車と一軸直結の大型水中電動機形式を有している。電動機は52多極同期型を採用し周波数制御によって水位変動に即した広範囲の運転が可能となっている(表1)。

ポンプは水平2分割の構造で、下半分をコンクリート基礎に埋め込み、上半分は取り外すことが可能で、容易に維持管理ができる構造をとっている。

* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 富津工場 プロジェクト室
** 同 同 同 ポンプ技術第一室 計画設計グループ
** 同 荏原博ポンプ 研究開発部 大型ポンプ設計課

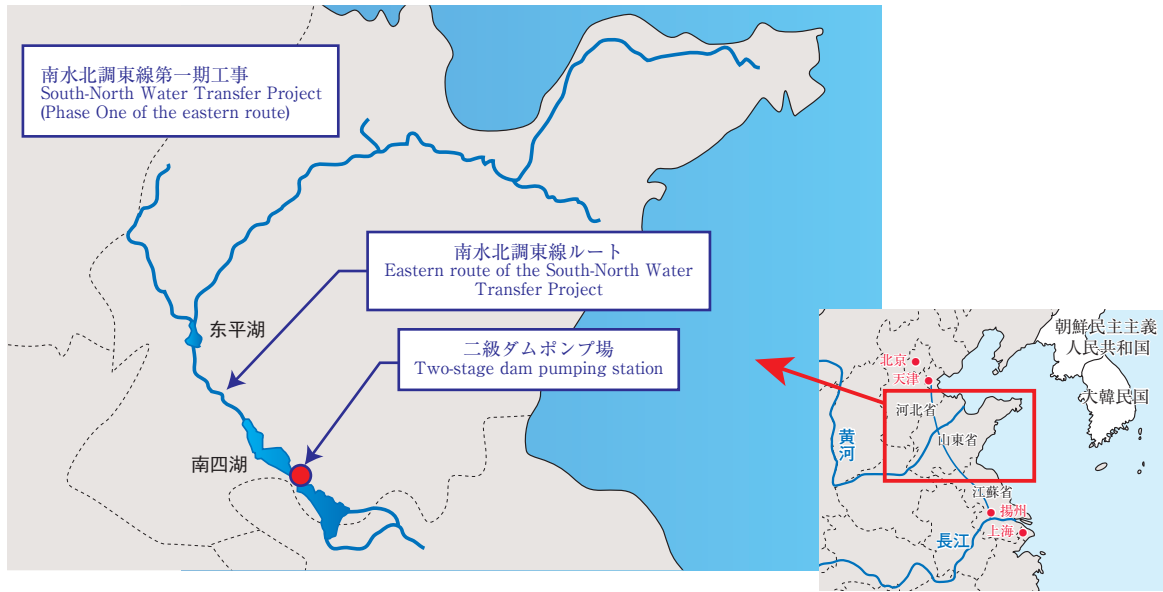


図1 ポンプ場位置図

Fig. 1 Location of the pumping station

表1 機器構成表
Table 1 Equipment outline

機器・設備名称 Equipment	数量 Sets	基本仕様 Specifications
ポンプ Pump	5台 Sets	口径3000 mm横軸軸流チューブラポンプ 3000 mm horizontal tubular pump
電動機 Motor	5台 Sets	1650 kW, 52極, 6 kV, 50 Hz, 3相交流同期電動機 1650 kW × 52 poles × 6 kV × 50 Hz synchronous motor
		起動方式 Starting method : VFD起動 VFD start
		冷却システム 設備 : 空気冷却機及び冷却水循環設備 Cooling system : Air cooling facilities and cooling water pump unit
電気設備 Electrical panel	5式 Sets	空気冷却器 Air cooling facilities : ファン (5.5 kW) 2台, 15000 m ³ /s, ラジエータ, 電動機外側淡水冷却機 Fan × 2 sets, radiator, fresh water cooler on the outside of the motor
		冷却水循環装置 Cooling water : 貯留タンク 3.0 m ³ , 増圧ポンプ2台, 弁類, 配管及び計装品, 制御盤一式 pump unit : Storage tank, booster pump, valve, piping, instruments, control panel
計装システム Monitoring system	5式 Sets	6 kV空冷式周波数制御盤VFD 6 kV, air cooled, variable frequency drive VFD
		バイパス盤 高圧真空遮断機 Bypass : 7.2 kV × 3 phase × 7.2 kA, 630 A panels High voltage vacuum contactor panels
		機側制御盤 Local control unit
		励磁盤 Exciter panel
		ポンプ及び電動機監視用計装品 Instruments for pumps and motors



13-65 01/241

写真1 2級ダムポンプ場
Photo 1 Two-stage dam pumping station

3. ポンプ設備

3-1 納入機器概要

本ポンプは、水の流路が内・外ケーシングの環状部に形成されたバルブ型のチューブラポンプであり、回転部及び52多極同期電動機は全て内側ケーシング内に収められる構造を採用している。また、吸込み池と吐出し池の間の広水位差での運転範囲への対応から回転速度制御が行われる。

本ポンプ仕様を表2に示す。

3-2 流路

本ポンプ場の要項は、吸込み池～吐出し池間の水位差

表2 ポンプ仕様
Table 2 Specifications of the main pump

ポンプ形式 Pump type		横軸軸流チューブラポンプ Horizontal tubular pump	
機名 Model		3000HSTM	
台数 Number of units	台 Sets	5	
電動機定格動力 Motor rated power	kW	1650	
揚程	平均揚程 Average static head	m	1.99
	設計揚程 Design static head	m	3.21
	最大揚程 Maximum static head	m	3.82
	最低揚程 Minimum static head	m	0.48
流量（平均揚程時） Flow rate at average static head	m ³ /s	31.5	
同期回転速度 Synchronous speed	min ⁻¹	115.4	
回転速度範囲 Range of speed	%	70 ~ 110.3	
羽根車外径 Impeller outer diameter	mm	3000	
ケーシング最大内径 Max casing inner diameter	mm	5300	
電動機外径 Motor outer diameter	mm	3250	

によって規定されており、吸込み池～吐出し池間の水路形状は、設計段階からその損失、流れをCFD（Computational Fluid Dynamics）解析で検討・評価し、最適な形状に決定した。

図2に解析モデル図、図3に管路内速度ベクトル結果を示す。

3-3 模型試験

本機のような大型機の場合、設備の制限などによって

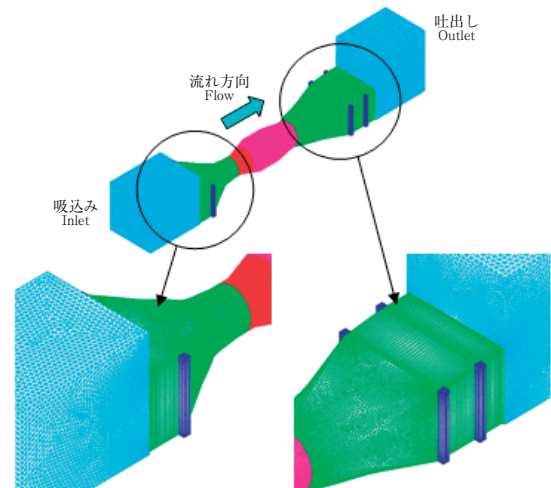


図2 解析モデル図
Fig. 2 CFD analysis model

工場での性能試験が実施できない。このため、ポンプ性能は実機の9.174分の1（模型羽根車外径327 mm）の模型ポンプを製作し、模型ポンプで性能試験を実施し検証した（図4）。

また、前述のように、模型試験においても吸込み池～吐出し池間の広水位差での性能保証を確認するため、水路形状も実機と相似に製作し検証を行った。

JIS B 8327に基づく性能換算によって実機ポンプは高効率性能を有している結果が得られた（図5）。

また模型試験の結果から、本ポンプは、広範囲にわたって運転可能であることが確認できた（図6）。

3-4 ポンプの特徴

本ポンプは、円筒状のケーシング最大径5.3 m（表2）を有し、コンクリートに半埋設している。また、ポンプ回転部及び電動機は水中内に設置される内側ケーシング内に収められている。この内側ケーシングは、外側ケーシングの

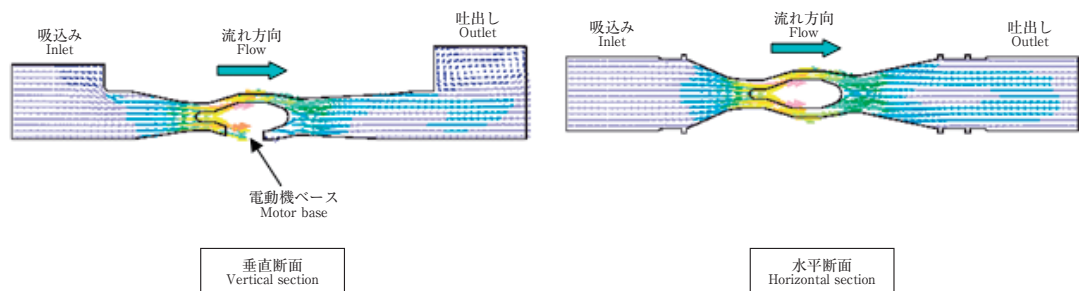


図3 速度ベクトル図
Fig. 3 Velocity vector

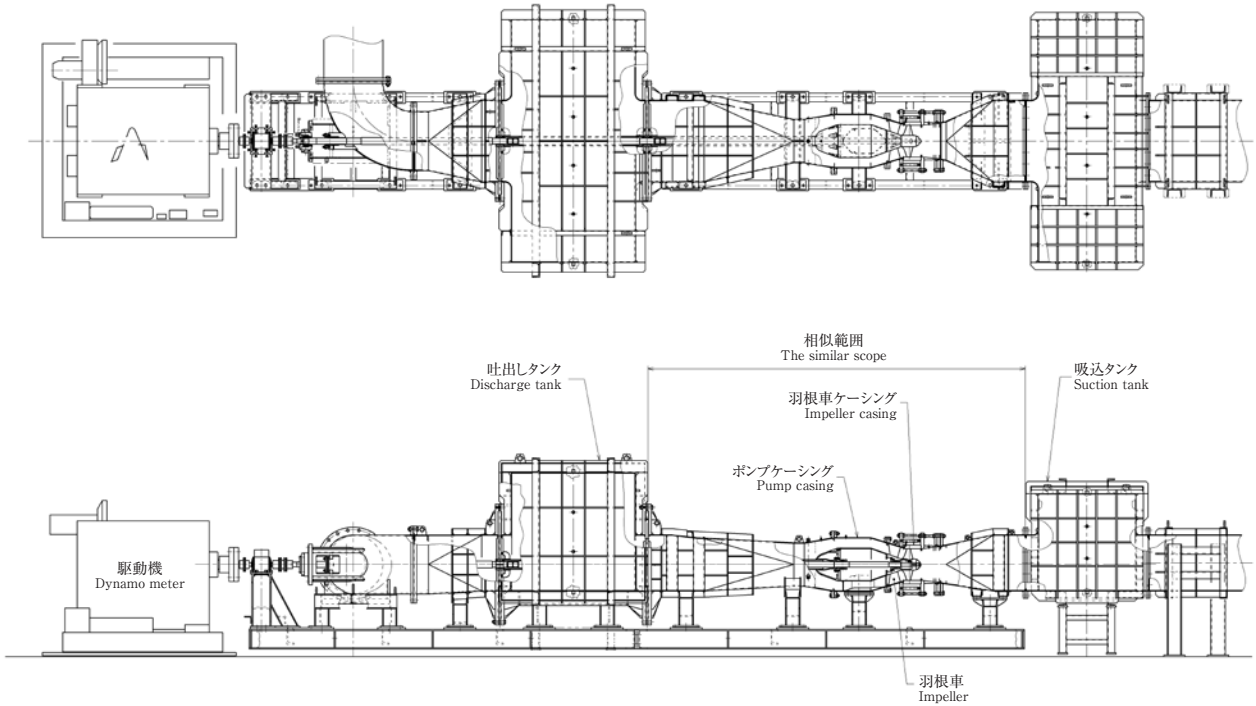


図4 模型試験装置

Fig. 4 Model pump equipment

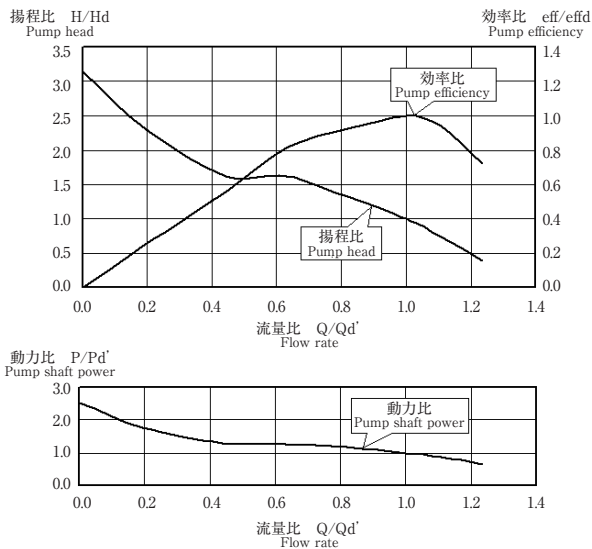


図5 ポンプ性能曲線 (模型ポンプ)

Fig. 5 Characteristic curve of the model pump

下部に設けられた流線形の支持台に取り付けられ、回転部の軸スラスト、内側ケーシングに作用する水圧力など外力の大部分はこの支持台で支えられる構造になっている。

前述のように電動機も含めた回転部全てが水中の内側ケーシング内に収められているため、ケーシング内の保守・点検を容易にするために点検通路を2箇所（内側ケーシング支持台内部の電動機上流に1箇所、下流に1箇所

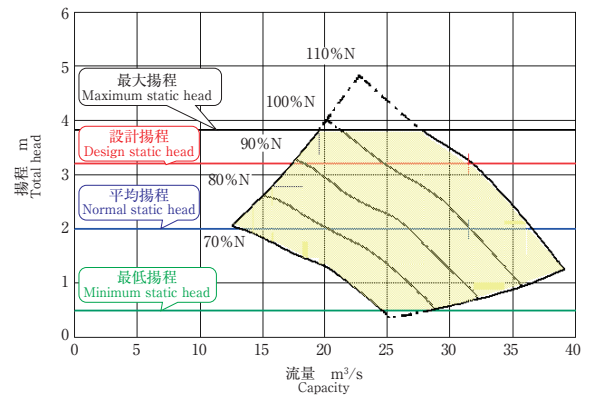


図6 ポンプ運転範囲図 (実機ポンプ)

Fig. 6 Pump operating limits (prototype pump)

の計2箇所) 設け、運転中においても電動機やポンプ各部の保守・点検を行うことができる構造としている。

羽根車は、外径3000 mmのステンレス鋳鋼製で5軸のNC (Numerical Control) マシンで全面加工された高精度な翼面形状を構成したブレード部を鋳鋼製のハブに取り付ける構造としており、電動機軸にオーバーハングさせ取り付けられている。

電動機は52多極同期型で、ポンプケーシング内の水路に設置されるため、その電動機ハウジングの水密構造部には、2重のゴムリングシールを採用した。電動機工場

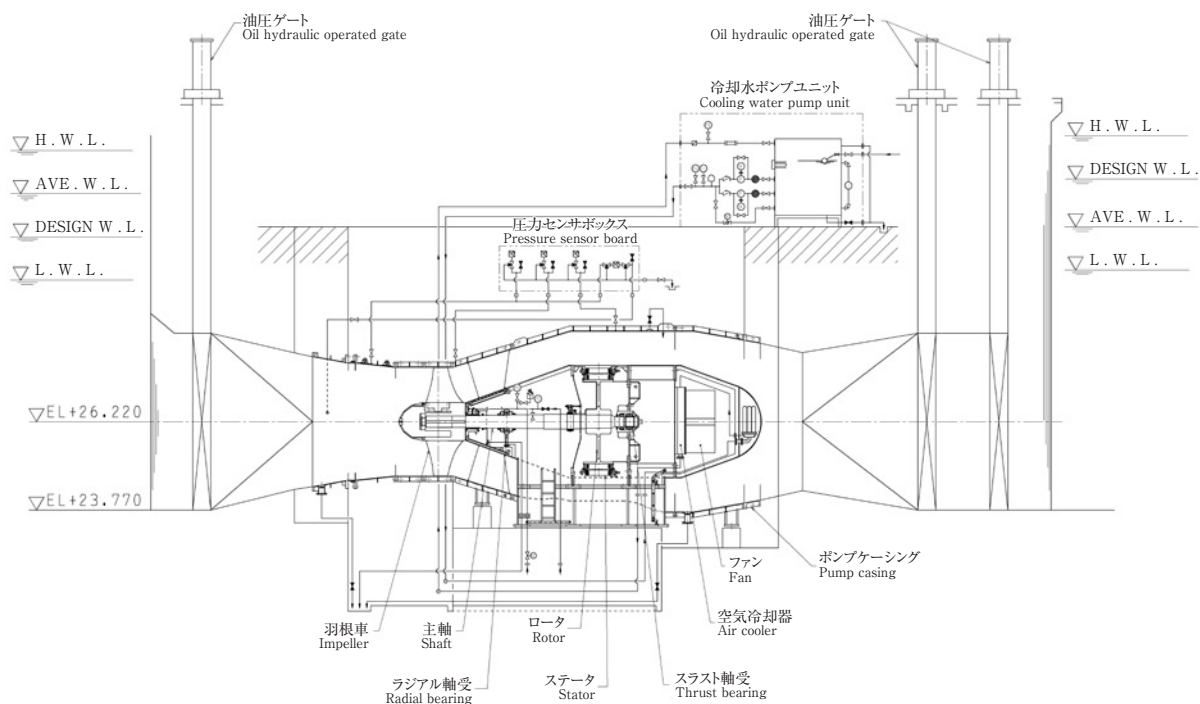


図7 ポンプ機器構成図
Fig. 7 General arrangement of pump equipment

では電動機ケーシング全体の気密試験を行い、現地での電動機組み立ての際は部分気密試験を行い、気密性を完全なものとした。また、水路内に設置されるため、通常のスぺースヒータ設置に加え、除湿機を内側ケーシング内に設け、湿度対策を図っている。

電動機コイルの冷却は、内側ケーシング内に設けた電動ファン+ラジエータで冷却し、冷却媒体は、循環ポンプによる閉ループで、ポンプケーシング最下流部内に設置した熱交換器によって、自流水で冷却する方式を採用した。冷却水循環ユニットは別置型でポンプ設置レベル上部に設置した。

軸受は、転がり軸受タイプを採用し、自然冷却とし、保守の簡素化を図った(図7)。

3-5 工場試験、製造、据付

前述のように、本機は大型機であること、現場ではクレーンの重量制限があったことから、電動機、ポンプは分解して輸送され現地で組み立てる方式を採用している。この方式を採用するに当たり、ポンプ・電動機の工場での製造確認が現地での品質・作業性向上に大きなポイントとなる。

ポンプケーシングについては、工場でのケーシングの仮組立を行うとともに、耐圧試験を現地での組立状態を想定し行っている(写真2)。



13-65 02/241

写真2 ポンプケーシング
Photo 2 Pump outer casing

ポンプ内ケーシングでもある電動機ケーシングは、電動機工場での気密試験を行い、その水密性の健全性を確認した。

本ポンプはポンプ工場での実機での負荷運転ができない。また、回転速度制御を行うことから電動機メーカーでポンプ羽根車を装着し、かつ回転速度制御盤VFD(Variable Frequency Drive)を含む電気設備を搬入仮配備し、連体無負荷試験を実施し機械的動特性(振動、騒音)確

認後出荷した（写真3）。

現地では、工場での仮組立状態の再現性確認、ケーシング分割面での水平度、中心位置の調整に注意を払いながら、埋設されるポンプケーシングをコンクリート浮力や流動性に対する固定を、ケーシング周囲に設ける数十箇所のターンバックルによって行った。

また、電動機の据付やポンプ羽根車周り部品の組立に当たっては、軸たわみ量を踏まえた芯出し調整、電動機マグネットセンター位置の再現性・調整に注意し組立作業を行った。

最終現地組立作業中においては、内ケーシングや電動機台の組立時に、気密確認によって水密性確保の確認作業を行った（写真4、5、6）。

4. 電気、制御設備

4-1 概要

今回当社が納入した電気設備は6 kV受電以降の電気／回転速度制御設備である。

本機場の運転制御は基本的に中央制御室のDCS（Distributed Control System）による中央監視制御とし、機側盤LCU（Local Control Unit）では現場連動、単独及び回転速度制御運転が可能である。当社は中央からの指令以降の運転制御設備を納入した。

4-2 納入設備

納入した電気・制御盤構成は、6 kV受電盤、VFD商用電源バイパス切替盤、回転速度制御盤VFD、及び制御盤LCU、励磁盤からなっている。

4-3 操作回転速度制御設備

運転方法は連動、単独の2種類の運転モードがあり、

特に連動の場合には、VFDを介さずに運転可能なBYPASSモードを設けている。

BYPASSモードの場合の起動はポンプ起動後低速域で同期投入し100%回転速度に達した後商用電源にバイパス自動切替えされる。



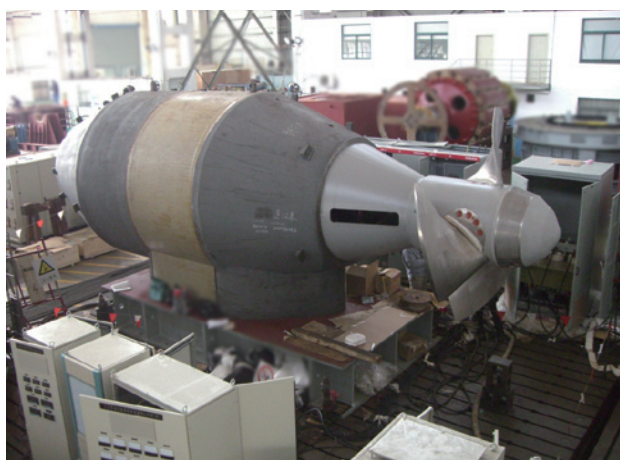
13-65 04/241

写真4 ポンプケーシング搬入
Photo 4 Transporting the pump outer casing



13-65 05/241

写真5 ロータ据付中
Photo 5 Installation of the motor rotor



13-65 03/241

写真3 連体無負荷試験
Photo 3 Motor testing



13-65 06/241

写真6 羽根車組立中
Photo 6 Assembly of the pump impeller

表3 状態監視センサー一覧
Table 3 Monitoring instrument list

名称 Item	計器 Instrument
電動機ケーシング振動 Motor case vibration	加速度計 Accelerometer
軸振動 Shaft vibration	変位計 Displacement meter
回転速度 Speed	回転計 Speed sensor
固定子温度 Stator temperature	測温抵抗体 RTD
軸受温度 Bearing temperature	測温抵抗体 RTD
ケーシング内湿度 Humidity in the motor case	湿度計 Humidity sensor
固定子絶縁 Insulation of the stator	絶縁計 Insulation sensor
冷却水流量 Flow rate of cooling water	流量計 Flow meter

またVFDモードの場合は起動後設定された回転速度へ自動制御される。どちらのモードの場合でも規定回転

速度に達するとポンプ吐出し側に設置の油圧ゲートが全開となる。

健全な運転を維持するための監察システムは各種センサを備えており長期運転での監視体制を強化している(表3)。

5. おわりに

現在最終竣工運転を待っている。

全てのポンプ場建設が完成し、南水北調東線プロジェクトで北部への水供給が常時可能となり、地域の安定と発展を切に望むところである。

受注後本計画を着実に遂行のため、顧客技術者との数多くの打合せを重ねた。これら綿密な打合せや議論によってお互いが理解しあい顧客要求に沿うポンプが完成できた。この間御指導いただいた山東南水北調工程建設管理局、南水北調東線山東幹線有限責任会社、2級ダムポンプ場建設管理局、山東省水利勘測設計院、水利部水工金属結構質量検験測試中心の方々及び関係していただいた方々に改めて感謝の意を表す。