

揚水発電所向け補機用磁気軸受の開発

DEVELOPMENT OF CANNED PUMP WITH MAGNETIC BEARING FOR PUMPED STORAGE POWER STATION

笠 謙新*・有田勇二*・林 秀彦*・芝野桂一郎**

Kenshin RYU, Yuji ARITA, Hidehiko HAYASHI and Keiichiro SHIBANO

Grand packing and mechanical seal are widely adopted as a shaft seal of the general pumps used for hydropower stations to prevent water leakage. As of bearings of pump and motor, ball bearings are generally used because of low cost. These mechanical elements, however, inevitably require the periodical maintenance to avoid their mechanical troubles through the life span of pump and motor. Therefore, users especially of chemical plants are eager to have a developed pump free from the problem of maintenance and risk of the environment pollution.

At this time, an epoch-making pump and motor is developed realizing non-leak of shaft seals and maintenance free of bearings. The pump structures of canned seal tube with active magnetic bearings are capable of having seal-less and no contact bearing.

Key Words : auxiliary pump , hydro power station , seal , ball bearing , canned , active magnetic bearing

1. はじめに

従来、水力発電所に用いられているポンプは、ポンプと駆動用モータがベース上でカップリング接続されて回転駆動している。ポンプ内の流体はインペラの回転によって吐出されるが、ポンプ内の昇圧された流体が回転軸から漏洩することを防止するために、一般的にメカニカルシールまたはグランドパッキングが用いられている。また、軸受には汎用性が高く廉価なボールベアリングが使用されている。このようなポンプモータの故障またはメンテナンスのほとんどは、回転体との接触部品である軸シールおよび軸受部分に集中しており、寿命に応じて定期的な交換や日常的な点検が必要であることから、メンテナンスフリーのポンプモータの開発に対する期待は、非常に大きい。特に人体および環境に有害となる流体を取り扱う化学・薬品プラント用ポンプでは、非常に有効なポンプとして位置付けられる。

そこで、モータ回転軸の軸端部にポンプのインペラを直接装着し、回転軸全体を磁気軸受で非接触浮上支持して流体中で回転させることにより、これらの問題を根本的に解決できる画期的なポンプモータの開発を行った。完成した

ポンプモータは関西電力(株)奥吉野発電所の主軸封水加圧ポンプとして納入し実用運転開始後、約1年6ヵ月を経過し順調に運転を継続している。

2. 従来型ポンプの問題点

従来型ポンプモータはポンプ、モータがそれぞれ独立した構造となっており、軸連結はカップリングによって行われるため精密な据付調整が必要である。軸受はポンプ、モータそれぞれ2組のボールベアリングが用いられ、運転時間、回転速度、軸振れおよび運転時の動的外力による軸振動に応じた寿命があり、定期的な取替を要す。また、軸封水装置はメカニカルシールが用いられ、回転体に対し常時摺動することから、摩耗および配管中のスラリーに起因したエロージョンによる流体漏洩が生じ、調整および取替が必要である。

一般的なポンプモータの保護方法は、ポンプインペラ部の異物などによる過剰負荷および軸受焼損時に発生するモータ過電流検出によるサーマルリレーでのトリップのみであり、運転時の異常監視は行われていない。表-1に従来型ポンプの特徴とメンテナンス性、また図-1に従来型ポンプモータ構造図を示す。

* (株)日本工営横浜事業所 パワーソリューション部

** (株)日本工営横浜事業所 営業企画室

表 - 1 従来型ポンプの特徴とメンテナンス性

従来型ポンプ	
構造上の特徴	モータとポンプはカップリングで連結 モータ冷却は空冷式
外形寸法	Φ400×1350
軸シール	軸シールはメカニカルシール等を使用
軸受	ボールベアリング
メンテナンス性	ボールベアリングの寿命およびメカニカルシールの摩耗による定期的なメンテナンスが必要
安全性	軸の露出部が一部あり、巡視時注意を要す
現地工事	軸レベル、振れの調整が必要

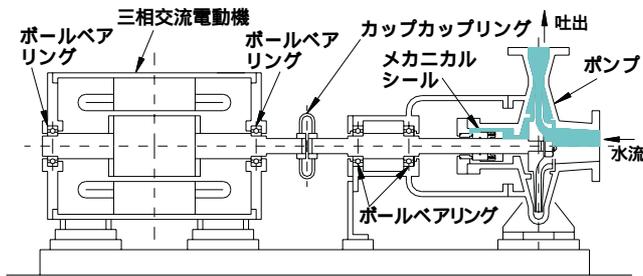


図 - 1 従来型ポンプモータ構造図

3. 磁気軸受を用いた密封型ポンプの開発要素

(1) 開発の概要

従来型ポンプの課題は軸封水部およびボールベアリングの定期的なメンテナンスが必要となること、また、リアルタイムな運転状態管理が不完全であることである。これらの課題に対する開発要素としては、以下の技術項目がある。

封水部を省略する方法としてキャンド(Canned)モータと呼ばれる完全密封型ポンプモータの構造とする
完全非接触軸受として磁気軸受を採用し、メンテナンスフリーと運転状態監視を行う

これらの項目の実現によって、従来型ポンプモータの課題を解決し、メンテナンス性および信頼性の高いポンプとなる。

(2) 磁気軸受の原理

磁気軸受(Active Magnetic Bearing)は、相対する電磁石の磁気吸引力によって回転軸を吸引し、回転軸の位置に応じた電磁石の界磁電流を制御することで、完全な非接触状態で空中に保持する軸受である。軸受には回転体の静止荷重と運転時の動的荷重が作用した際に、軸ポジションと変位センサーの基準位置間に偏差が生じる。この偏差に応じた磁気吸引力(コイル電流)を変化させ、変位センサーの基準位置に安定するよう制御する。図 - 2 にラジアル軸受の基本原理図を示す。

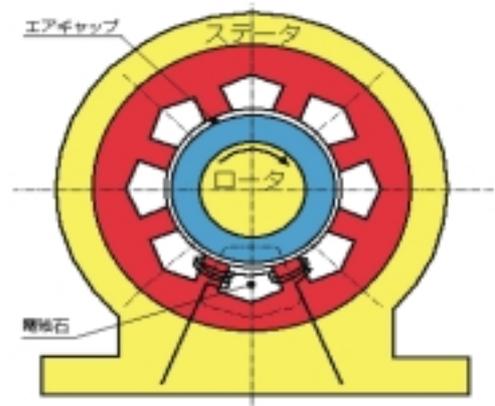


図 - 2 ラジアル軸受の基本原理図

制御回路は回転軸の位置を検出する変位センサーの信号と制御基準位置を比較し、PID 制御により補償する信号処理部、信号をモニターする監視部、および信号処理部からの司令に応じてコイル電流を調整する増幅部によって構成されている。ここで用いた PID による軸受制御とは、基準位置との偏差に比例する出力を出す比例動作(Proportional action:P動作)と、偏差の積分に比例する出力を出す積分動作(Integral action:I動作)と、偏差の微分に比例する出力を出す微分動作(Derivative action:D動作)との総和による制御方式である。モニタリングを行う監視部の機能として、軸受に作用する荷重の変化や外乱の状況のリアルタイム表示や運転状況の数値管理などが可能であり、最近では制御回路をデジタル化することにより小型化を図ると同時に、通信機能を持たせ遠隔操作や監視が可能である。図 - 3 に制御方式の基本構成図を示す。

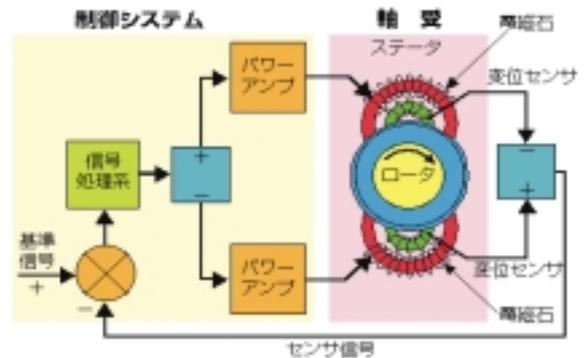


図 - 3 制御回路の基本構成

(3) 密封型モータ(キャンドモータ)の構造

軸シールレスを行うことは、ポンプ内流体がモータ内エアギャップに侵入することになる。したがって、モータは侵入した流体に対し電氣的絶縁、防錆、圧力に対する機械的な保護が必要となる。

一般的にこれらの保護には二つの方法があり、簡便な方法として巻線には耐水線を用い、鉄心表面には塗料の塗布

によって保護したモータがある。しかしこの方法は、流体摩擦により、絶縁物の摩耗および鉄心塗料の剥離による酸化が発生しやすく、耐久性に問題がある。一方、確実な方法としてモータ内径に肉薄の保護管を挿入し、缶(キャン)によって回転子を包みこみ内部流体との隔離を行う密封型モータ(キャンドモータ)がある。キャンドモータ用のキャンには流体に対する防錆、耐圧が要求されるため、一般にステンレスが用いられ信頼性、耐久性に優れるが、モータのギャップ磁束による渦電流損が増加し、キャン厚によりエアギャップが大きくなって励磁電流が増加する欠点もある。

4. 磁気軸受型密封ポンプの設計

(1) 磁気軸受型密封ポンプの定格

開発の対象としたポンプは、既設の揚水発電所の主機用主軸封水加圧用であることから、ポンプ定格は既設ポンプと同一とした。モータは高速回転においても機器寿命に影響がないという磁気軸受のメリットを生かし、かご型誘導電動機の2極(同期回転速度:3600r/min 60Hz)を採用した。これによりモータの回転速度を既設の約2倍とし、小型化を図った。表-2にポンプモータの仕様比較表を示す。

表-2 ポンプモータ仕様表

		仕様
ポンプ	揚程	40m
	流量	400 $\frac{m^3}{min}$
	常用使用圧力	2MPa
モータ	出力	11kW
	電圧	AC400V
	周波数	60Hz
	極数	2P
	回転数	3560r/min

(2) 磁気軸受型密封ポンプの構造と特徴

磁気軸受型密封ポンプの構造上の特徴は前述の通り、キャンド化によるシールレスポンプであること、および磁気軸受を用いた完全非接触軸受であることの2点である。以下に、この構造を採用したことによる特徴について記載する。

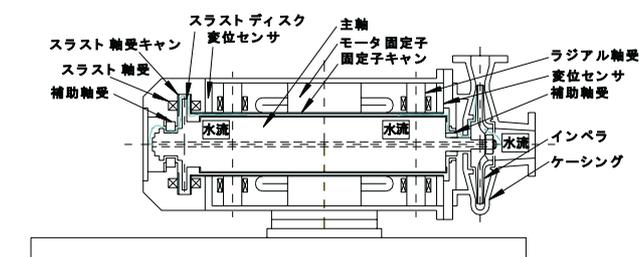


図-4 磁気軸受型密封ポンプ構造図

1) 流体の循環による冷却作用

密封ポンプの大きな特徴の一つは、常時流体中で回転子が回転することである。したがって、流体と回転子外周には摩擦が発生することから、流体がモータ内部で滞留しないよう循環経路を確保する必要がある。

流体の循環経路は図-4に示す通り、ポンプ吐出側の高圧力部からインペラ背面のシール部を通過し、モータエアギャップおよび磁気軸受エアギャップを通過して軸端まで到達、その後軸中心に設けた循環用貫通穴によって、インペラ低圧側に循環する経路となる。この流体の循環は、軸受やモータの発熱体である鉄心やコイルに密接した部分を通過するため、流体による内部の直接冷却となり高効率で熱交換される。

2) 流体中の補助軸受ギャップ

磁気軸受を採用する場合には、万一の制御盤の故障や電源喪失時に機械的な損傷を防止する目的で補助軸受が必要である。補助軸受ギャップは磁気軸受エアギャップの50%程度に設定しており、通常運転時の軸は補助軸受とは接触しないで回転している。

この補助軸受ギャップは、通常のキャンドポンプに用いられている水中軸受の約10倍程度であることから、液中のスラッジによるエロージョンは発生しにくく、メンテナンス周期を延ばすことが可能となる。

3) 据付レベル調整

本ポンプは1軸上にインペラ、モータ、磁気軸受を構成していることから、内部点検時の分解は非常に容易となる。また、非接触の磁気軸受では、従来の軸受のような片当りなどは発生しないため、装置の据付け傾斜の許容値は比較的大きくすることができ、精密なレベル調整は不要である。したがって、回転機の熟練作業による組立は不要で作業時間も短縮できる。

表-3 磁気軸受型密封ポンプの特徴とメンテナンス性

	磁気軸受型密封ポンプ
構造上の特徴	回転体が非接触である 回転子は使用流体中で運転される モータ冷却は水循環による水冷式
外形寸法	Φ300×900
軸シール	シールレス構造 シール部給水配管レス
軸受	磁気軸受による非接触 デジタル制御軸受 最大ラジアル容量:1100N 最大スラスト容量:1800N 消費電力:800W
メンテナンス性	水質に応じた摩耗量に対し補助軸受を交換 軸受制御基盤交換が必要
安全性	回転部の露出がなく、巡視時に安全
現地工事	軸レベル調整不要

(3) 軸受容量

これまで当社が取り組んできた水車発電機への磁気軸受適用で培ったノウハウに加え、回転子が水中で回転運動する場合に発生する流体の粘性抵抗や回転子の見かけ上の慣性力を実験および数値解析によって求め、各軸受の設計荷重を表 - 4 の通り設計した。

表 - 4 軸受の荷重設定

		静荷重	最大動荷重	定格荷重
		(N)	(N)	(N)
スラスト軸受		1000	200	1800
ラジアル軸受	インペラ側	625	20	770
	スラスト側	475	35	970

(4) 軸受制御装置

この密封ポンプモータに適用した磁気軸受は5つのインダクタンス型変位センサと10個の軸受コイルをポンプモータ内に配置して、10個のアンプとデジタルPIDコントローラで回転軸を5軸方向で制御する装置である。

軸受制御装置システムブロック図を図 - 5 に示す。電源部のAC/DC変換ボード、軸受制御部のデジタルコントロールボード、電流増幅部のアンプボード、外部入出力部のI/F(インターフェース)ボード、計4枚の基板で構成されている。基板の大きさはそれぞれ200mm×110mmとなっており、コンパクトな制御装置構成が可能となる。以下にそれぞれの概略仕様を示す。

1) AC/DC変換ボード

既設ポンプモータを交換するときの便宜を考慮して、磁気軸受駆動電源はモータと同じ電源を使用できるものとした。

- 入力電圧：AC400、AC200V
- 出力電圧：DC150V DC24V DC8V ±DC15V
- 入力容量：500 VA

2) アンプボード

PWM方式アンプで1ボードで10出力を行う。

- 搭載アンプ数：10個
- 各アンプ出力電流値：0～4 A
- 内部DC電源：DC150 V
- スイッチング周波数：40 kHz
- 短絡保護：個々のアンプ
(出力端子間、各出力端子とアース間)

3) コントロールボード

32ビット DSP によるデジタル PID 制御とセンサ信号処理を行う。また、磁気軸受装置の状態監視も合わせて行う。図 - 6 に軸受状態監視画面を示す。

軸受制御方式：デジタルPID制御

入力/出力：6入力(5センサ入力、1予備)
7出力

(5アンプ制御指令、2バイアス電流指令)

CPU：Motrola 683xx family processor

DSP：Texas Instrument TMS 320C5xx family

4) I/Fボード

接続情報とRS232Cインターフェースで外部と情報交換を行う。

- 状態表示接点：1点
- 警報接点：1点
- ウォッチドック接点：1点
- RS232Cインターフェース：2ポート

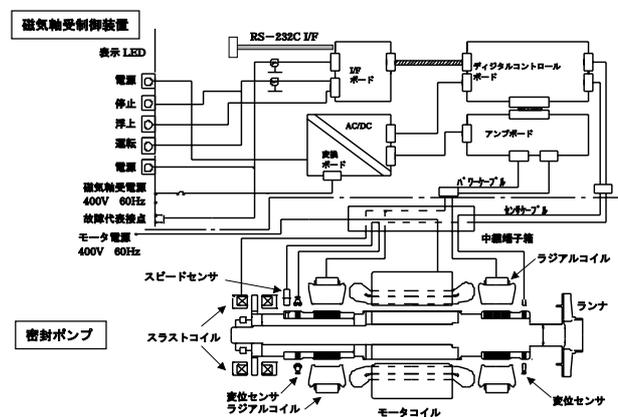


図 - 5 軸受制御装置システムブロック図

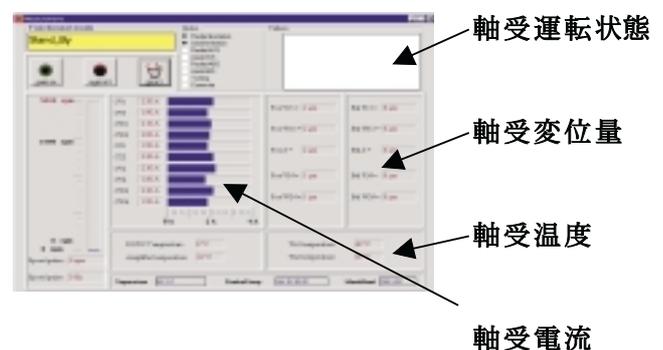


図 - 6 軸受状態監視画面

(5) 軸受調整

磁気軸受型密封ポンプモータの回転軸を安定した位置制御する場合、空気中の状態とモータポンプ内が流体で充た

されている2つの状態を満足する伝達関数が必要となってくる。今回、回転軸を空気中での制御状態から、流体で充たされた環境に変化させた場合、軸受剛性が不足して不安定な状態となる。これは、回転子が空中より水中の方が水の抵抗で動かし難くなるからで、制御パラメータを設定する場合に以下の内容を考慮に入れて調整を行う必要がある。

回転子に荷重が付加される
負の軸受剛性が増加する

そこで、PID 制御パラメータを空気中の約5倍程度の軸受剛性に調整を行い、安定した制御状態を構築することが出来た。

(6) 軸受製作

写真 - 1、写真 - 2 は当社工場内で製作中のラジアル軸受およびスラスト軸受を示す。

ラジアル軸受はコイル絶縁樹脂硬化後に直列接続、各コイル口出し線および温度センサーを装着した状態である。

スラスト軸受は鉄心にコイルを挿入して位置調整した状態であり、この後、鉄心内ギャップに樹脂を充填し硬化させている。

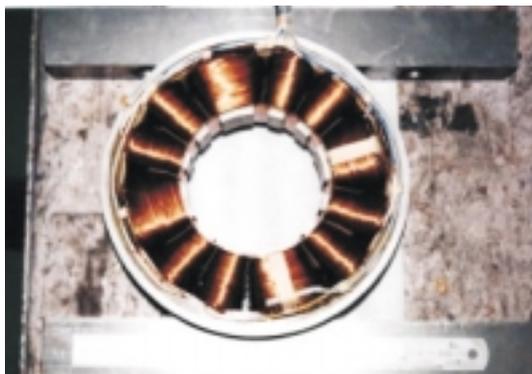


写真 - 1 ラジアル軸受

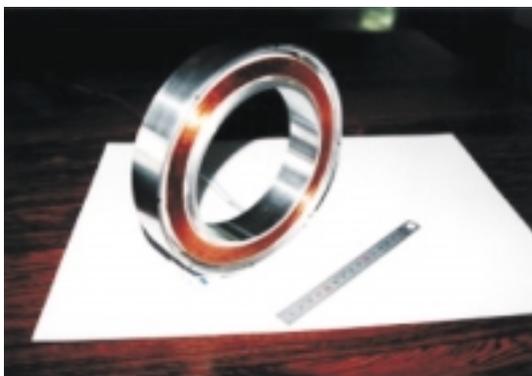


写真 - 2 スラスト軸受

5. 現地試験

完成した磁気軸受型密封ポンプを写真 - 3 に示す。以下に、現地での試験結果を記す。

(1) 軸受変位置

現地試験時のインペラ側ラジアル軸受変位オービット図を図 - 7 に示す。中心の楕円は軸中心の実軌道を示し、外周円は設計許容変位限界を示す。実負荷運転時における最大変位量は両振幅(P - P)値で約50 μ mとなり、許容変位量である補助軸受ギャップ値(P - P値: 250 μ m)に対し約5倍の裕度を有し、非常に安定した軸受制御が得られた。

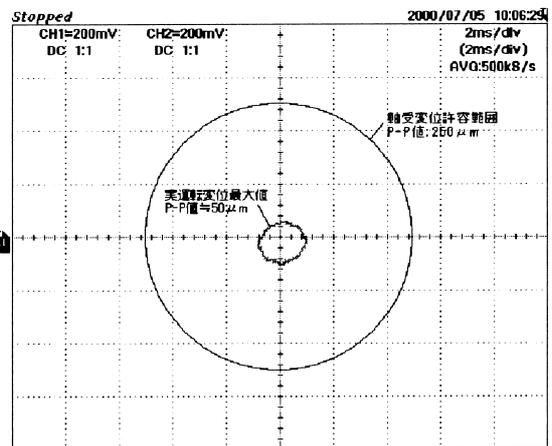


図 - 7 ラジアル軸受運転時変位置

(2) 負荷ヒートラン

実負荷運転時の負荷ヒートラン試験における各部の温度上昇値を図 - 8 に示す。各軸受コイルの平衡温度はスラスト軸受で46、ラジアル軸受は49 となりモータ内部を循環する水による冷却効果が非常に有効であることが確認できた(水温: 11.5 室温: 16)。

この結果から、年間を通して比較的低温で温度変化の少

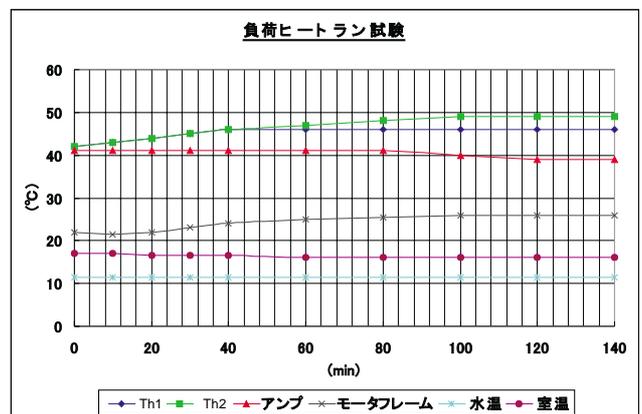


図 - 8 負荷ヒートラン試験結果

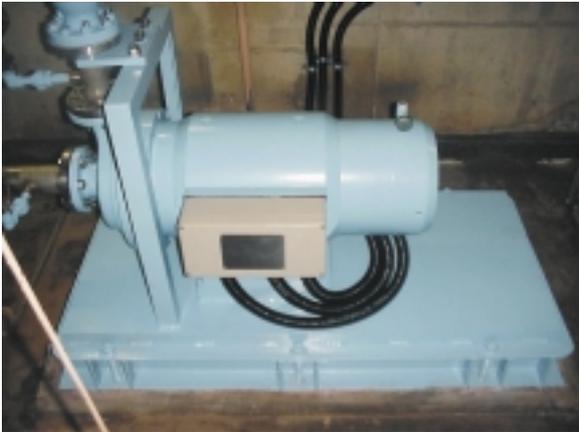


写真 - 3 磁気軸受型密封ポンプ完成写真

ない流体用ポンプにおいては、軸受コイルの電流密度を更に高密度設計することが可能であり、更なる小型化が図れる見通しを得た。

6. 今後の課題および展望

(1) 技術的課題

実用開発したポンプには、以下の技術的な3課題があり今後の機種開発にはこれらの解決が必要となる。

1) ポンプモータの総合効率改善

磁気軸受型密封ポンプは従来型のポンプと比べ、前述のモータエアギャップ、キャンによる渦電流、内部流体摩擦によって若干効率が低い。ポンプ構造、モータ形状および電気特性の最適値を解析し、総合効率の改善を行う必要がある。

2) 間接冷却方式の検討

化学プラントに用いる密封ポンプでは、流体温度が常温(40℃)以上の適用が考えられ、この場合は流体によるモータおよび軸受の直接冷却効果を期待することはできない。他の冷却方式による冷却構造と熱解析による効果的な冷却方法の検討が必要である。

3) 設計の標準化

磁気軸受型密封ポンプは汎用の化学・薬品ポンプとして販売促進することが望ましく、製品機種の多様化が必要である。部品の共有やコストダウンを志向した標準設計化を行い、顧客ニーズに応じた供給体制の確立が必要である。

(2) 営業および経済的課題

1) コストダウン

軸受および制御装置の開発コストのために、従来機との

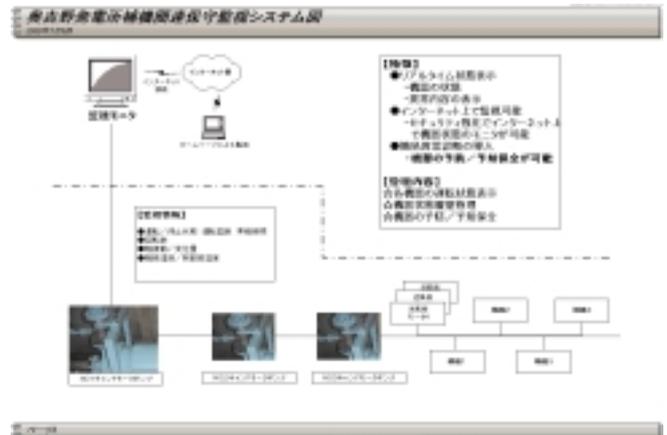


図 - 9 保守監視システム概念図

単純比較では約2.5倍のコスト増となった。今後、民間企業への営業展開を図るには、コストダウンは必要不可欠であり、部品レベルでの簡素化や製作工法の改善および量産効果によるコストダウンが課題である。

2) 適用分野の開拓

磁気軸受型密封ポンプのメリットを最大限に生かせる適用分野は化学・薬品・食品プラントや高価流体用ポンプであり、これらのアプリケーションにおける潜在的ニーズは非常に高い。従来の電力会社中心の営業範囲を拡大し、石油・化学・薬品プラント会社へのアプローチが必要となる。

(3) 今後の展望

大規模発電所や化学プラントではポンプなど補機ならず送風ファン、圧縮機などへの展開を図ることも可能である。このようなプラントで複数台の補機管理を行う場合は、磁気軸受制御盤の監視機能を用い運転状態および軸受状態のリアルタイム状態管理が行える集中管理システムによって遠隔での機器運転管理を行うことが可能である。図 - 9にはそのシステム概念図を示した。またさらに当社が顧客に代り運転管理を行う、運転管理代行業務への発展も可能である。

参考文献

- 1) 須郷康史：技術士会、最近の磁気軸受アプリケーション動向、技術