

〔展望・解説〕

循環水ポンプ

林 英 樹*
高 木 正 年*
安 藤 嘉 彦*

1. まえがき

この数年来、わが国の社会情勢は大きく変わってきており、産業界をとり巻く環境も増々その厳しさを増してきている。昭和48年から49年にかけての石油危機を契機に省資源論議が活発化し、社会生活の向上と産業の高度成長に対する見返りとして近時環境保全が真剣に叫ばれている。また、つい先頃のスリーマイル原子力発電所の事故をきっかけに、機器の信頼性・安全性が一層強く問われるようになった。一般社会生活に深い関わりを持つポンプ業界においてもこのような時代の流れが影響するところは極めて大きい。

この観点から本文は発電所用循環水ポンプについて、その現状と問題点のいくつかを取り上げ、読者の参考に供したい。

2. 大形化の特徴及び問題点

近年発電所の出力が大きくなるにつれ循環水ポンプもスケールメリットの点から大容量化し、原子力発電所向けポンプでは吐出し口径が4,000耗の超大型ポンプが出現した。表1は最近増設された火力・原子力発電所用の口径2,500耗以上の循環水ポンプの実績である。

ここではポンプの大形化に伴う技術的・経済的な問題として構造、製作及び性能試験についてふれる。

2-1 構造上の特長

従来、吐出し口径2,000耗クラス迄は一床式床上吐出し形が比較的多く採用されていたが、大形化が進むにつれて床荷重や床上部のポンプの安定性及び吸込みピット構造などから二床式または一床

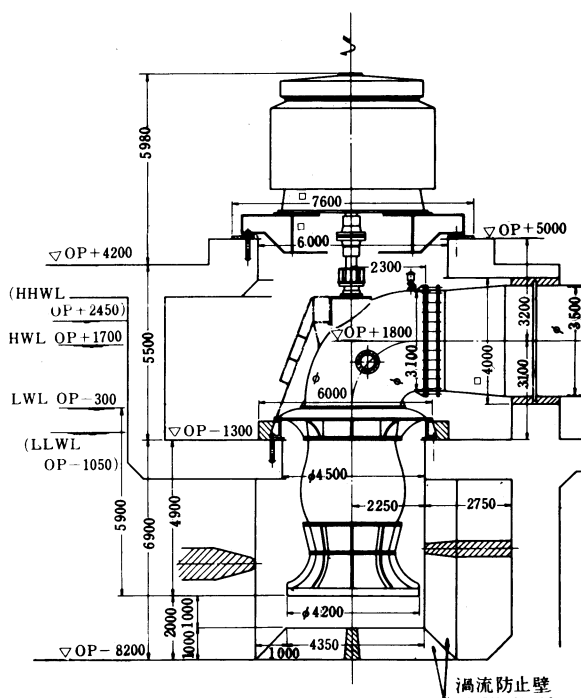


図1 二床式循環水ポンプ

式床下吐出し形の設置例が多くなった。（図1に二床式循環水ポンプの例を示す。）

二床式の大きな特長は、ポンプ据付床とモータ据付床に荷重が分散されるため土木構造上で有利になることがあげられるが、同時にポンプ据付床の下面を運転最低水位よりも下げることができるのでいわゆる自由表面からの空気吸込み渦の発生がなく、ポンプ没水深さを小さくできるメリットがある。最近の大形循環水ポンプに二床式が多く採用されていることは上記床荷重やピット構造上の合理性及びイニシャルコストの低減等を考慮したものである。

表1 最近増設された代表的循環水ポンプ⁽¹⁾
(口径2,500耗以上)

納入先	発電所名	発電所出力 (MW)	口 径 (mm)	流 量 (m ³ /min)	全揚程 (m)	回転数 (rpm)	モータ出力 (kW)	台数	備 考
関西電力	大飯 No.2	1,170	4,000	2,172.5	11	135	5,100	2	可動翼 二床式
東京電力	福島第一 No.6	1,100	2,800	1,260	13.1	198	3,500	3	二床式
九州電力	玄海 No.2	559	2,800	1,068.8	10	185	2,300	2	可動翼
中部電力	知多 No.5、6	700	2,600	950	11.8	220	2,850	4	可動翼 プルアウト形
東京電力	袖ヶ浦 No.4	1,000	2,600	1,141	15.5	225	3,750	2	二床式
東北電力	秋田 No.4	600	2,600	845.5	23.1	244	4,100	2	可動翼 二床式
九州電力	新小倉 No.3、4	600	2,500	860	9.7	209	2,500	4	プルアウト形
中国電力	下松 No.3	700	2,500	940	13	222	2,700	2	二床式

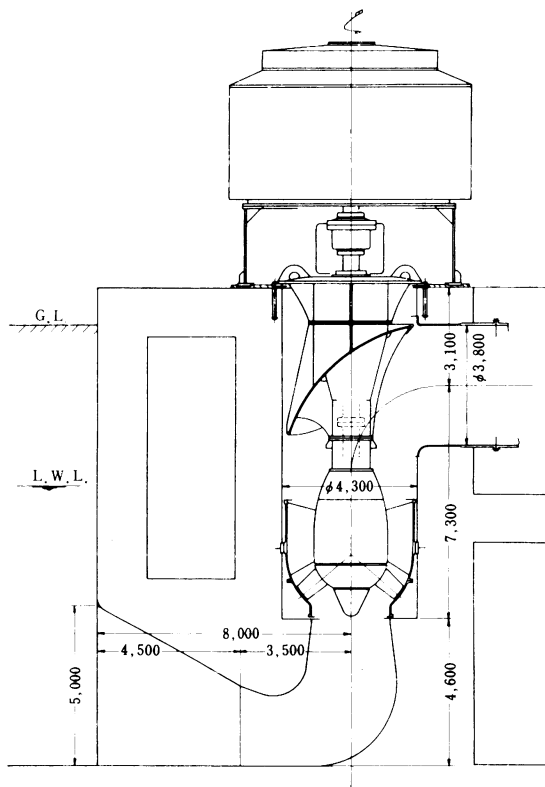


図2 コンクリート構造案

なお、特殊な例として図2の如く土木構造と一体化してポンプを構成し、ポンプ外殻部分と吸込水路及び吐出水路部をコンクリート構造として全体のコストダウンを図る案も考えられている。これは従来、超大型の排水ポンプに多数採用されており、循環水ポンプの場合はコンクリート面の流

表2 翼角制御機構の駆動方法の特長

駆動方式	油圧式	機械式
駆 動	油圧サーボモータ	電動機
手動操作	油圧があれば手動操作可能。	可能。但し長時間を要す。
操作力	油圧およびサーボシリンダ径の選定により任意。	駆動モータの容量及び減速比による。
翼角度を一定位置に保持する場合	圧油が必要	自己保持
操作時間(応答性)	任意に選定でき、応答性も早い。	駆動モータの回転数減速比による。
その他	大容量に適す。開閉時間は任意に設定できる。	比較的小容量に適す。高速開閉には不向。
自動制御	可能	可能

水に対する保護方法など解決すべき問題はありますが、今後は積極的にユーザ、メーカー間で検討されていくものと思われる。

一方、数年前から循環水ポンプに可動翼ポンプが採用される傾向が見受けられる。これは循環水ポンプの大形化によって、可動翼にすることの種々のメリットがクローズアップされたものといえる。以下に可動翼ポンプの構造について触れる。

可動翼斜流ポンプの構造の一例を図3、図4に示す。翼角制御機構の駆動方法は油圧式と機械式とに分類できる。図3は機械式の構造を、図4は油圧式の操作系統を示したものである。それぞれの特長は表2に示すが、ほとんどが油圧式を採用している。

油圧式による翼角度の制御方式は大略以下の通

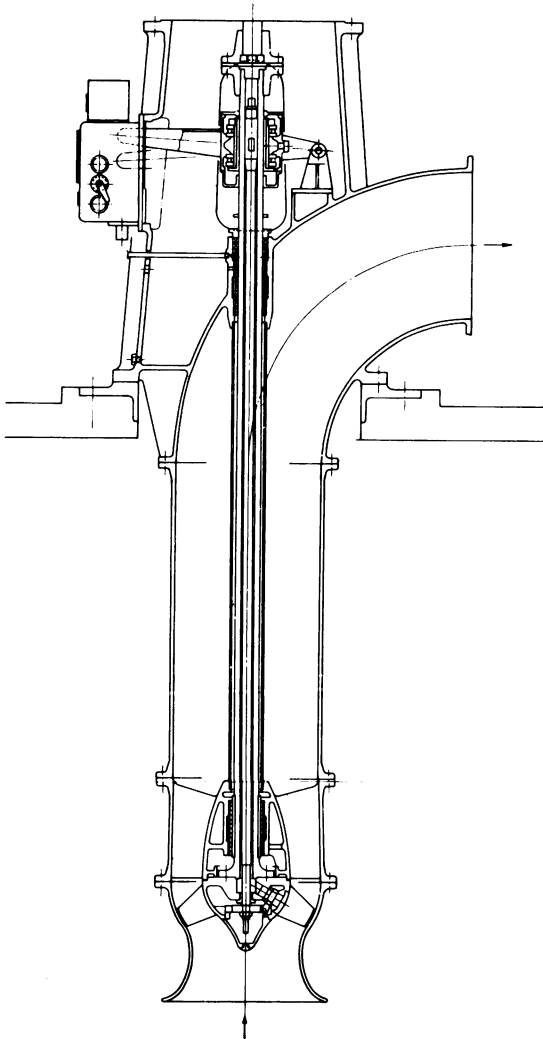


図3 立軸可動翼斜流ポンプ構造図⁽²⁾

りである。油圧ユニットにより供給された圧油を配圧弁を経てサーボシリンダ内に送りピストン前後に生じる圧力差を利用してポンプシャフトの中央を貫通する操作棒を上下させる。この動きをクロスヘッドとアームを介して羽根の回転運動に変換して翼角度を変えるものである。斜流ポンプの場合は軸流ポンプと異なり、クロスヘッドと可動羽根のステムのなす角度が直角でないため、連結棒にはユニバーサルジョイントやリンクの組合わせが採用されている。

油圧式の場合、操作油圧の設定が設計上一つのポイントになる。即ち油圧を高く設定すればサー

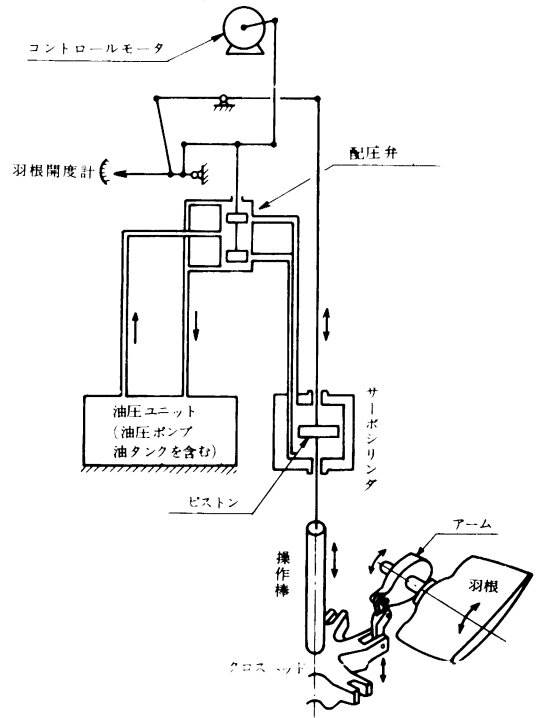


図4 油圧式操作系統図⁽²⁾

ボシリンダ径を小さくでき、それに伴ない油ポンプの容量が小さくなって全体としてコンパクトになるが、反面油系統のシール方法がむずかしくなる。油圧を低く、設定した場合はその逆となり、両者の兼ね合いにより決める必要がある。

機械式、油圧式共通の留意点は、リンク機構を内蔵している羽根ボス内の潤滑油の漏洩又は外部からの海水の浸入防止対策であり、シール材およびシール方法には十分注意することが肝要である。

2-2 製作上の問題

単機容量の増大に伴ない、必然的に機器の信頼性の向上が必要となり、より高い品質が要求されることは言うまでもない。

通常循環水ポンプは設計圧力からいっても薄肉大径となるため、特に耐圧部品の鋳造方法の検討が重要であり、一方、加工性及び組立・据付時の芯出等から十分な剛性が要求される。このため、従来の設計をそのままスケールアップするのではなく、上記の検討事項をふやえた総合的なVE設計手法が必要となる。

また、ポンプが大形化すると鋳造能力、機械加工設備、輸送制限等から一部超大型部品に対しては分割構造にせざるを得ない。この場合、現地での取扱い、分解スペース、クレーン容量等についても検討を要する。一般に海水を扱うポンプの構造として、できるだけ部品の接合面を少なくした方が腐食の防止や分解、組立時の手間の点でも有利であるが、分割構造が避けられない場合は接合面の腐食に対して十分な配慮が必要である。

2-3 性能試験上の問題

ポンプの大形化により容量的、構造的に工場での実負荷性能試験が困難となる場合がある。現在各ポンプメーカーとも通常の試験設備では口径2,600耗ないし3,000耗前後が限界であり、これを超えるると以下の如き多くの問題が出てくる。

- 1) 吸込ビットの容量の制限
- 2) 試験場の地耐力とクレーン容量の制限
- 3) 流量測定設備とその精度
- 4) 吐出し配管設備とその配置
- 5) 受電容量からの動力上の制限
- 6) モータの分割搬入、再組立、分割出荷
- 7) 試験設備の長期専有による他ポンプへの工程上の影響

したがってこれらの問題点を総合的に検討して工場試験が不可能な場合の性能保証はJIS B8327“模型によるポンプ性能試験方法”の適用、もしくは現地での実機性能試験を行う必要がある。

2-4 模型試験

模型試験は模型～実機間の相似性を確保するための製作寸法の詳細検査と高精度の模型試験専用設備を必要とするが、実機試験のような大がかりな設備、人員、時間を必要とせずしかも正確な測定が可能である。

JIS B8327では模型から実機へのスケールアップによる効率上昇はムーディの $\frac{1}{2}$ 乗式を採用し、この効率上昇分の $\frac{1}{2}$ 乗づつを吐出し量及び全揚程の増加分として修正するべく定めてある。

模型ポンプの効率から実機の効率を算出にする方法についてはこれまで多くの換算式が提案されているが、大型ポンプが製作される昨今では模型試験の換算式の統一を図る必要性が高く、実用上及び経験上から最も妥当なものとして上記したJIS

の制定に到っている。

一方、ユーザ側としては排水口での温排水の及ぼす環境問題などから実機流量のより正確な把握が必要となり、模型試験による性能保証だけでは受け入れられないケースもでてきている。

こうした背景のもとに数年前から、模型試験と現地における実機試験との併用により模型からの換算性能と現地性能との比較確認が行われるケースも見受けられるが、いずれはこれらの実績をふまえて模型試験のみで実機の性能を保証するという考え方がユーザーとメーカー間で合意されるものと思う。

2-5 現地試験

現地試験における最大の問題点は流量の測定とその精度であり、管路内圧が正圧で、気泡の発生もなく、内部流れが一樣となるような直管部の長い管路が得られれば超音波流量計、ピート管、カレントメータ等の使用が可能となる。この場合の測定精度は一般に $\pm 1 \sim 2\%$ 以内とされている。

しかし、最近では用地問題や環境条件から発電所の建設敷地に制約があり、管路内が正圧となっている復水器入口側に15～20Dの直管部を設けることが困難な場合もあり、こうした条件下で性能試験を行うためには全プラントの計画時点で流量測定位置、使用計器及び測定精度などについて十分な検討と同意が必要である。

ピート管あるいはカレントメータの如く管内設置形流量計による流量測定は技術的及び取付け準備などの制約もあるので、たとえば超音波流量計のように管外からの測定が容易であり、更に直管部もそれほど必要なく、かつ気泡が含有しても測定可能な流量計の研究開発が盛んに行われている。

3. 循環水ポンプにおける省資源

この問題を広い意味で捉えるならばポンプの計画、設計、製作から運転保守に至るまでのすべてがこの対象となるであろうが、これを一つ一つとりあげて論ずるには余りにも大きな課題であり、限られた紙面では尽せないで、ここでは次の三点について提案する。

3-1 ポンプの揚程、水量の低減

近時循環水ポンプは大形化によりその消費動力

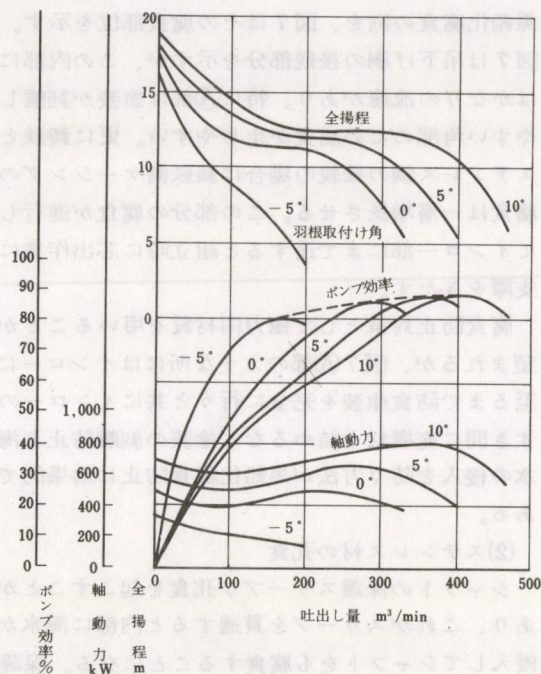
図5 可動翼斜流ポンプの性能曲線⁽²⁾

図6 ケーシングの黒鉛化腐食例

が3,000kWを超える例が少ない。又連続運転されることを考えるとそのランニングコストは軽視することはできない。このような大きな消費動力を決定するものは当然ながらポンプの揚程と水量とであり、これ等が全プラントの中で妥当であるか否かを見直すことによって動力の低減が可能

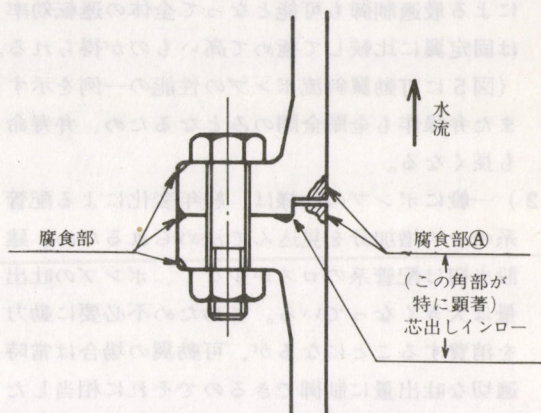


図7 ケーシングの黒鉛化腐食部

ではないだろうか。すなわち計画時に配管のレイアウト、付属機器の諸損失やマージン等の見直しによりポンプの必要揚程、水量の減量ができればこれは大きな消費動力の低減につながる。

3-2 ポンプの高効率化

ポンプの効率の上昇は即動力の低減になる。大型ポンプの効率は今では90%近くにまで達しており、既に限界に達した観があるが、消費動力が大きいだけに少しでも効率を上昇させられることが望まれる。またポンプは必ずしも最高効率点で運転されるばかりではないので部分流量、特に過大流量における効率の改善も望まれる。又一方、如何なる運転流量時でも、その時の効率を最高効率点に近づける配慮が考えられ、以下に示す可動翼の実現が需要の要求と合致して出現するに到った。

3-3 可動翼ポンプの採用

1) 火力発電は、従来受け持っていたベースロードとしての役割を原子力発電にゆすりつつあり逆にピークロード用として考えられる傾向にある。このため発電量は負荷に応じ増減できるよう計画され、循環水ポンプの吐出量もこれに追従することになる。この場合、吐出量の調整は固定翼ポンプでは吐出側の絞り弁により制御されるため、弁シートの損傷等の恐れがあり好ましい方法とは言えない。又、単機容量が大きくなっている今日では絞り弁での損失も無視し得ぬ値となる。

一方、可動翼斜流ポンプの場合は、負荷に応じて弁を絞ることなく流量制御ができ、電算機

による最適制御も可能となって全体の運転効率
は固定翼に比較して極めて高いものが得られる。

(図5に可動翼斜流ポンプの性能の一例を示す)
また弁操作も全閉全開のみとなるため、弁寿命
も長くなる。

2) 一般にポンプの仕様は、経年変化による配管
系のロス増加分を見込んで決められるため、建
設当初は配管系のロスが少なく、ポンプの吐出
量は大きくなっている。このため不必要に動力
を消費することになるが、可動翼の場合は常時
適切な吐出量に制御できるのでそれに相当した
電力の節約となる。

3) 起動時には最小翼角度で起動することができ
るため、起動電流も小さくすることができ電気
設備上も有利である。

以上の如く、可動翼斜流ポンプは省エネ時代に
適合したポンプ形式であり、今後共増加してい
くと思われる。

4. 腐食と貝付着防止対策

国内の循環水ポンプはほとんどが海水を扱って
いる。この限りにおいてはポンプ構成材料の腐食
及び貝付着問題は避けて通ることのできないのが
現実であり、海水ポンプの保守上の問題はこの二
点に代表されると言っても過言ではない。腐食の
大きなものは部品の強度及び機能をそこない、又
貝の付着が軸受潤滑水ラインを閉塞するに至って
はポンプ運転に致命的なダメージを与える。そこ
でこれらの対策について簡単に触れて見たい。

4-1 腐食とのその防止対策

腐食の形態とその程度は使用材料、使用条件、
環境、あるいは部位によって異なるが、経年的な全
面腐食は一般に軽微であり、ほとんど問題にはな
らない。しかし、局所的な腐食は集中的に進行す
るのでその傷は深く問題となることが多い。

循環水ポンプにおいて代表的な腐食は鋳鉄系材
料の黒鉛化腐食およびステンレス鋼の孔食、すき
間腐食である。

(1) 黒鉛化腐食

鋳鉄系材料の黒鉛化腐食は海水流速が速い所、
又水流の衝突や乱流がある所、あるいは防錆塗料
の剥離部分によく見られる。図6はケーシングの

黒鉛化腐食の例を、図7はその腐食部位を示す。
図7は吊下げ胴の接続部分を示すが、この内部に
はかなりの流速があり、特に①部は塗装が剥離し
やすい角部のため腐食が生じやすい。更に鋳鉄と
ステンレス鋼の接続の場合は鋳鉄側ケーシングの
腐食は一層増長させる。この部分の腐食が進行し
てインロー部にまで達すると組立時に芯出作業に
支障をきたす。

腐食防止対策として極力同材質を用いることが
望まれるが、図7①部のような所にはインローに
至るまで防食塗装を完全に行うと共にインローの
すき間に充填材を詰めるなど塗装の剥離防止と海
水の侵入を防ぐ方法が黒鉛化腐食防止に効果的で
ある。

(2) ステンレス材の孔食

シャフトの保護スリーブが孔食を起こすことが
あり、これがスリーブを貫通すると内部に海水が
侵入してシャフトをも腐食することになる。保護
スリーブの腐食は溶接や熱処理など製造上の問題
海水汚染や異物の付着、ポンプ停止時の欠乏酸素
海水との接触などの単独又は複合原因によって生
じるものと考えられる。以前は材料がSUS304で
腐食は見られなかったが、近年はSUS316L(低
炭素モリブデン入りステンレス鋼)でも溶接部が
腐食することがある。さらに溶接箇所をなくした
構造では孔食はなくなるが、スリーブの端部(継
ぎ部)に生じるすき間腐食(後述)は避けることが
できない。

これ等のスリーブの腐食防止対策の例としてエ
ポキシ樹脂コーティングやゴムライニングがある。
これ等についてはスリーブの構造やコーティング
施工、あるいは分解組立等取扱い上の問題などが
あるが、これらに十分留意して実施すれば、現在
のところ最も有効な方法と思われる。

(3) ステンレス鋼のすき間腐食

ステンレス製フランジの合わせ面やOリング溝
スリーブの継ぎ部分にはすき間腐食を生じること
が多い。実機ポンプにおいてすき間部分をなくす
ことは不可能であり、一方使用材料にすき間腐食
に対して抵抗力のある材料、たとえばインコネル
625やハステロイC276を採用することは、コスト
の面で歓迎されない。従って現状では次の如き対

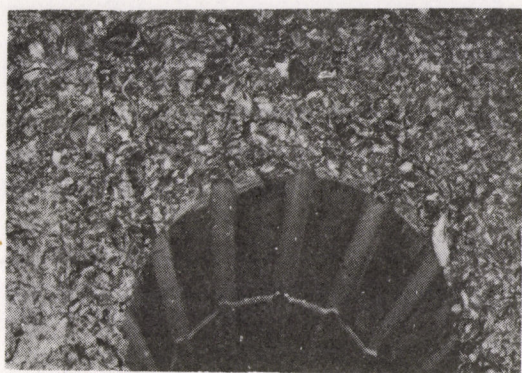


図8 ゴム軸受部に付着した貝類

策が採られている。

- 1) エポキシ樹脂コーティング、又はゴムライニング
- 2) 防錆塗料の塗布
- 3) 防食用シートパッキンの使用
- 4) 液状パッキンやペースト類の使用
- 5) 犠牲金属の取付け

しかし、これ等の対策は現在のところ必ずしも完全ではなく、今後一層の改善が急がれている。

4-2 貝付着防止

図8はポンプ連続運転においてゴム軸受部に貝が付着した例である。この場合は軸受潤滑水が通らなくなりゴム軸受が焼付を起こす。

ポンプに付着する貝はムラサキガイ、フジツボが主であり、これ等の貝は幼生の時期に付着し成体に成長したものである。以前は海水取水口に塩素注入を行い幼生を死滅させていたが、最近は公害問題からこれを中止しているところが多いので貝の付着問題が急激にクローズアップされてきている。

貝が付着する環境条件は海水流速が遅い(約2 m/s以下)所ほど付着しやすく、また防錆塗装面にも好んで付着する。他方、回転体や流速が約3 m/sを超えるケーシング内面およびステンレス鋼にはほとんど付着していない。

このような貝の付着状況をふまえて現状ではポンプ構造の変更や防汚塗料の採用を行っており、それなりの効果は見られるがまだ十分とは言えず一層の研究・改善が急務である。

5. 今後の課題

5-1 信頼性の向上

循環水ポンプの故障は直ちにプラントの停止につながるため、高い信頼性が要求される。現在では豊富な運転実績により信頼度の高いポンプとなっているが、将来に渡ってこの信頼度を維持し、更に一層高めていくことが最大の課題である。

このためには従来の実績のみでは不十分で、前述したポンプの「大型化」「省エネルギー化」等時代の要求に応じた設計・製作上の新しい技術開発とこれに呼応した工場での生産体制はもちろんのこと、現場における運転、取扱い、点検保守に至るまでの管理を含めた品質保証体制を確立していくことが必要である。

特にこれまでとかくポンプ本体にかくれて過小評価されがちであった付属機器の管理についてはソフトを含めた十分な機能の検討や保守点検に関する情報伝達の徹底と確認が重要なポイントの一つに加えられなければならない。

また設備等の点である程度はやむを得ないことではあるが、工場における管理と現場における管理には相当な差がある場合もあり、現場作業の管理レベルの向上も重要な課題となるであろう。

5-2 その他の課題

公害対策の一環として騒音規制の問題がある。今後も厳しく規制されるケースが増えると思われる低騒音のポンプ及びモータの開発と同時に防音カバー等の対策技術についても開発していく必要がある。

次に防汚対策(主として海生物の付着防止)および耐食性の向上については材質の選定、塗料の開発、シール剤の開発等と組合わせて検討を加えねばならぬ問題である。同時に海水の地域的な差異が大きく同じ対策が必ずしも同じ効果をあげることにならないので、据付場所の海水の調査などきめの細かいアプローチが必要となる。この問題については先の現場における保守管理レベルの向上と共にメーカーおよびユーザが一体となって対応を考えて行わねばならない。

6. あとがき

循環水ポンプの現状と問題点について簡単に触

れた。ここに取り上げた一つ一つについて、なお書き尽せぬ点もあるが、循環水ポンプに対する問題点の一端を理解していただければ幸である。

＜参考文献＞

- (1)日本機械学会 機械工学年鑑
(1977～1979)
- (2)日本機械学会 機械図集「ポンプ」

＜おことわり＞

本稿は前号(3月号)「火力発電機器」特集号のために執筆いただいたものです。編修の都合で本号掲載となりました前号とご併読下さい。

国際会議案内

会議名称：Fourth Joint Meeting MMIJ-AIME 1980, Tokyo

共 催：The Mining and Metallurgical Institute of Japan (MMIJ)
American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers
(AIME)

期 日：November 4 (Tuesday)–November 8 (Saturday), 1980

会 場：Sasakawa Memorial Hall
12–12, Mita 3-chome, Minatoku, Tokyo 105

連絡先：The MINING and Metallurgical Institute of Japan (MMIJ)
5–4, Ginza 8-chome, Chuo-ku, Tokyo 104 Japan
