

250kW 油封入式水中モートルポンプ

250 kW Oil Filled Type Submersible Motor-pump

白 木 勇*
Isamu Shiraki

篠 田 和 男*
Kazuo Shinoda

桑 原 行 雄**
Yukio Kuwabara

要 旨

記録的大容量の 250 kW 油封入式水中モートルポンプが完成し、現在好調に稼動中である。モータ軸にはポンプ羽根車がオーバハングし、水中モートルは地上のヘッドタンクにより常時油圧が加えられている油封入式を採用している。本稿では、油封入式水中モートルポンプの構造、保護方式などについて紹介すると同時に、油中における回転子の回転に伴う機械損、温度上昇についても簡単に説明する。

1. 緒 言

水中モートルポンプは、従来中容量以下の深井戸ポンプとして開発されてきたものである。しかるに最近水道用、農業揚水用、下水排水用にまで、水中モートルポンプの利点が生かされ使用されるにおよんで、モータ、ポンプともに大容量化されるようになった。

水中モートルポンプといっても、いわゆるポンプ部分（羽根車、案内羽根など）は通常のポンプと大きく異なることはなく、したがって水力学的性能に関しては従来のものとほとんど変わりがない。

水中モートルはその内部の液質の違いにより、充水式⁽¹⁾⁽²⁾と油封入式⁽³⁾の 2 種類が一般的に実用化されているが、いずれにしても陸上用モータに比べ特殊になるため、構造上、取扱上特別の考慮が払われねばならない。そのおもなものはつぎの 4 点である。

- (1) 軸 封 装 置
- (2) コイルの絶縁
- (3) 軸 受
- (4) 保 護 装 置（過負荷、軸受、絶縁など）

このたび茨城県桂村の農業揚水用として、記録的な大容量の 250 kW 油封入式水中モートルポンプを納入し、現在好調に稼動中であるが、ここにその結果を報告し参考に供したい。

2. ポンプ設備の概要

このポンプ場は茨城県桂村 那珂川の河川敷内に設置され、付近の農業用水の揚水用として使用されるものである。

モータポンプ仕様は次のとおりである。

600 mm 油封入式水中モートルポンプ.....	1 台
吐 出 量.....	40.2 m ³ /min
全 揚 程.....	26.5 m
回 転 速 度.....	1,000 rpm
電 動 機.....	250 kW, 三相 3,000 V, 50 c/s

ポンプの操作は堤防上に設けられた電気室において行なわれ、盤面手動操作方式が採用されている。

吐出管路は延長約 105 m に及ぶもので、ワノウェイサージタンクを 1 個設置して、停電時の水撃を緩和している。

図 1 にポンプ設備の外観を、図 2 にそれらの配置図を示す。

3. ポンプの構造

水中モートルポンプの形式はモータとポンプの相対位置により 2 種に大別される。すなわち図 3 に示すように、ポンプの上にモータがあるもの（これをモータ上置形という）と、ポンプの下にモータがあるもの（これをモータ下置形という）がある。

今回はモータ上置形を採用したが、その理由はつぎのとおりである。

- (1) 吸込ピットの掘さく深さを浅くできる。
- (2) モータが土砂でうずまる心配がない。

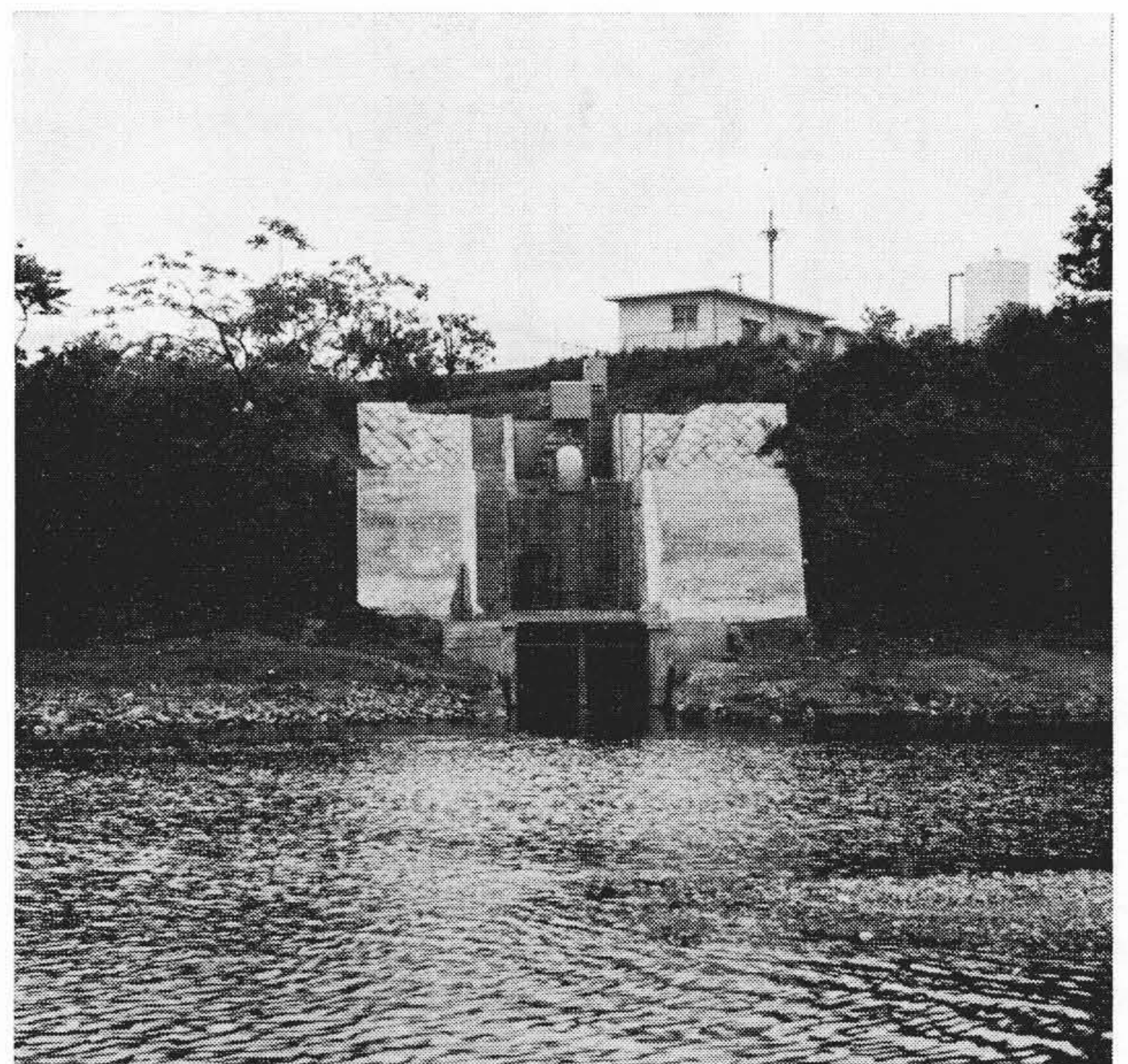


図 1 茨城県桂村 250 kW 水中モートルポンプ設備外観

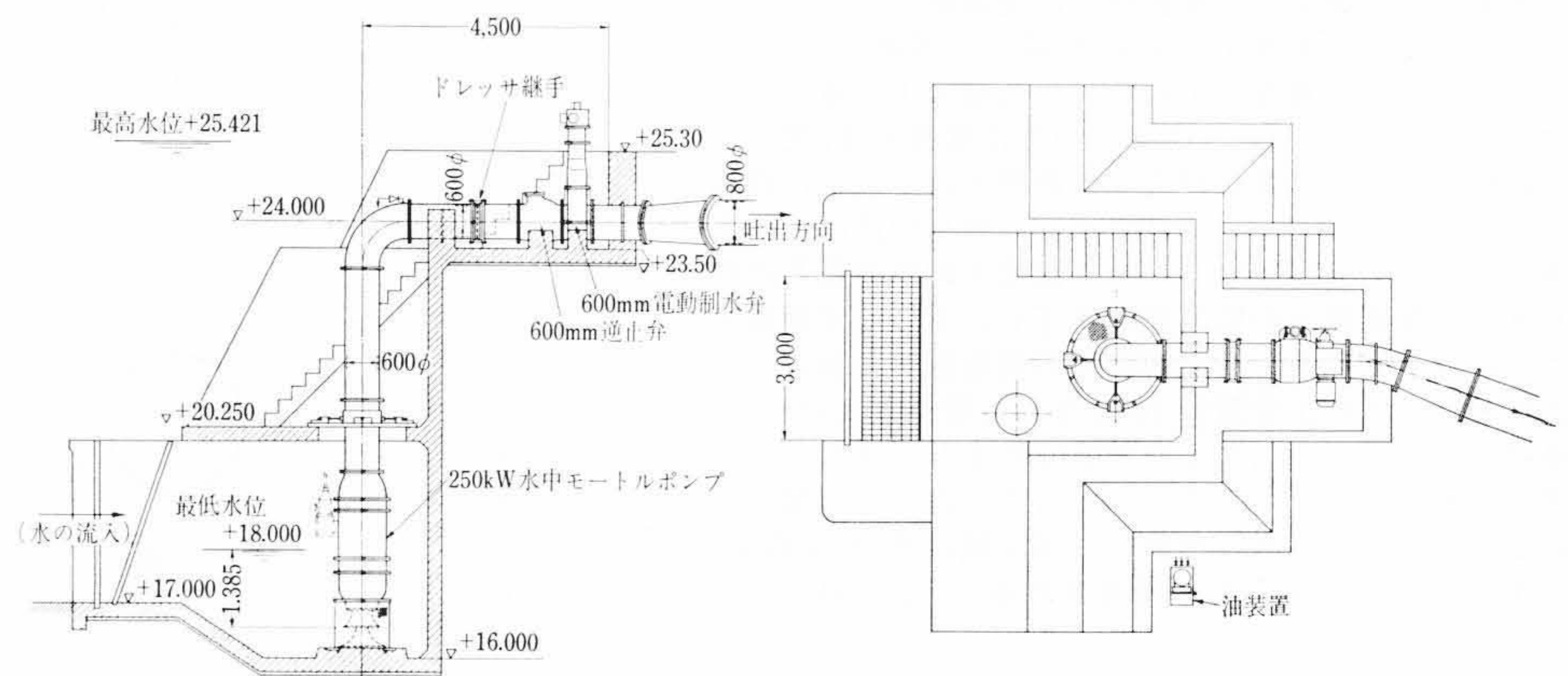


図 2 水中モートルポンプ設備配置図

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所亀有工場

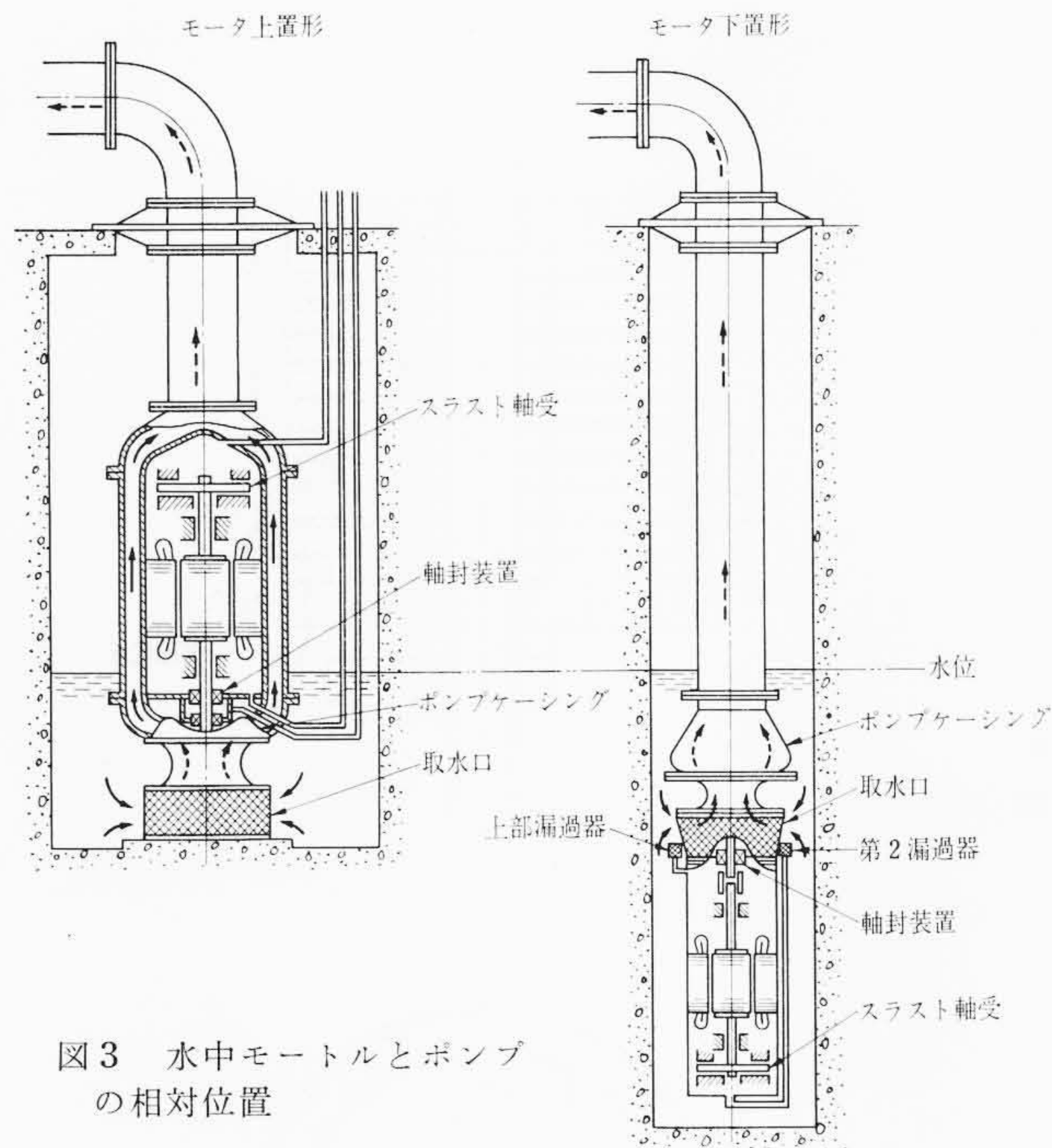


図3 水中モートルとポンプの相対位置

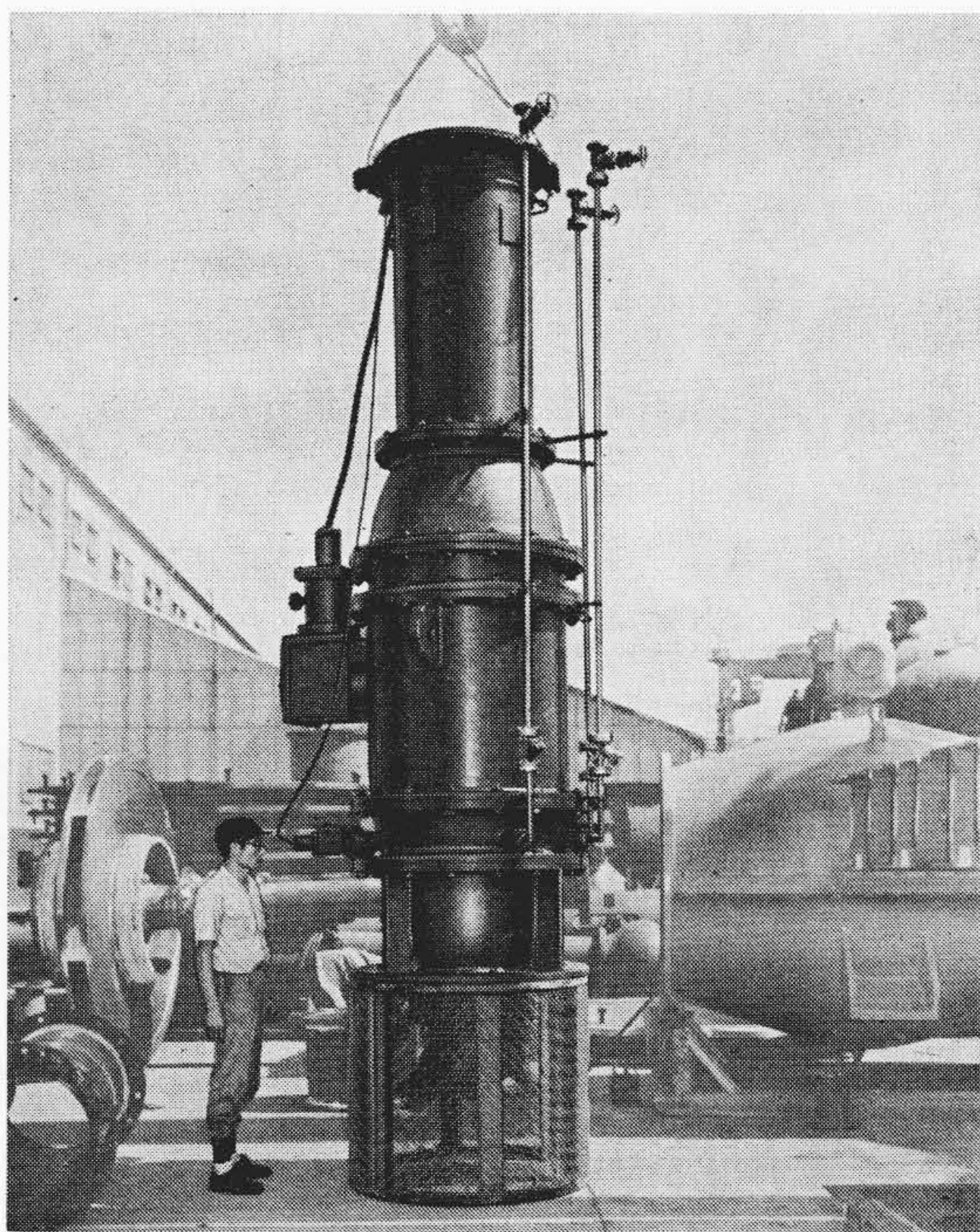


図4 250 kW 油封入式水中モートルポンプの外観

(3) モータ外周を揚水が流れるため、モータの冷却に効果がある。

図4は水中モートルポンプの外観を、図5はその構造を示したものであるが、羽根車はモータ軸にオーバーハングしており、その材料には耐食性の良い青銅を採用している。また羽根車の吸込口および背面には青銅製ウェアリングをはめ込み、軸封装置に高圧が加わらないように保護している。

ケーシングは鋳鉄製で案内羽根を有し、モータの固定子わく外筒にスムーズに圧力水が導かれるようになっている。

ストレーナとしては2メッシュのステンレス鋼製金網が用いられ、水中モートルポンプの全荷重を支える受け台を兼ねている。

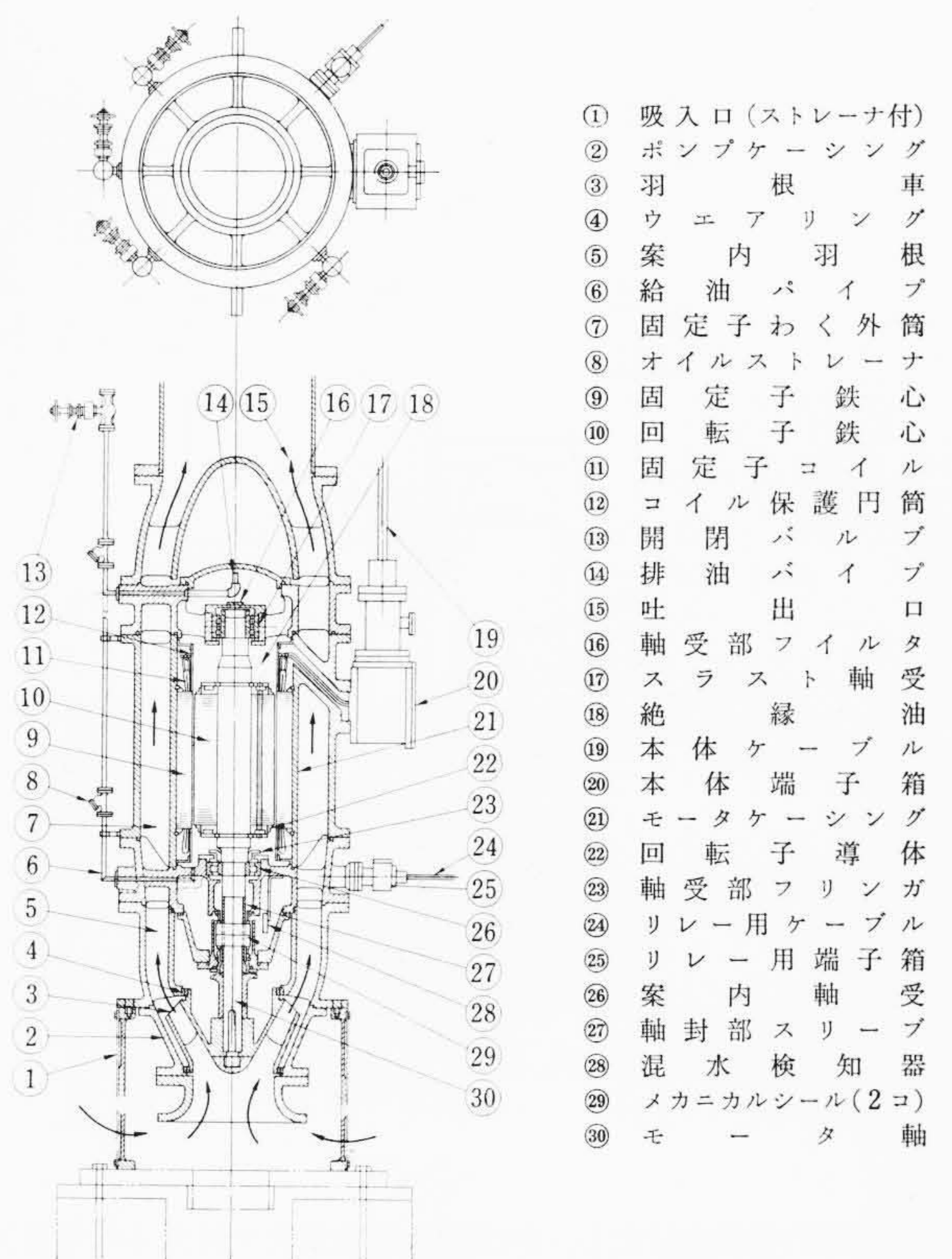


図5 250 kW 油封入式水中モートルポンプの構造

4. 油封入式水中モートルの構造

油封入式水中モートルにおいては、モータ内部への外水侵入を確実に防止することが重要な課題といえる。

4.1 軸封装置

モータ軸貫通部には2重のメカニカルシールを用いて、万一外側のメカニカルシールが破損しても内側のメカニカルシールによりモータ内部の油の流出防止ができるように考慮が払われている。

またモータ内部の油圧はヘッドタンクにより外部水圧以上の圧力に保ち、運転、停止中を問わずモータ内部への外水の侵入を防止している。

4.2 混水検知器の装備

2重のメカニカルシールにより囲まれたメカニカルシール室には常時油を充満させておき、なんらかの理由により外水が侵入した場合には、メカニカルシール室に装備された混水検知器により確実に検知することができる。

4.3 コロガリ軸受構造

モータ内部にはスピンドルオイル相当の動粘度を有する電気絶縁油が封入されているので、軸受にはこの油により潤滑されるコロガリ軸受を採用した。スラスト軸受には背面突き合せアンギュラコンタクト形ボールベアリングを、案内軸受にはローラベアリングを使用し、横、斜め、縦のいずれの据え付けも可能な構造としてある。また組立時には若干の異物が混入するおそれがあるのでじんあいによる軸受の損傷を防ぐために、スラスト軸受部には簡単なフィルタを、案内軸受部にはフリंगाを設けている。

4.4 耐油性コイル

コイルには、とくに耐油性のすぐれたエポキシ系ワニスとマイカを主絶縁材に使用しているため、長期にわたる寿命が保証できる。

4.5 コイル保護円筒

回転子の回転に伴い高速の油流を生ずるが、この油流によるコイ

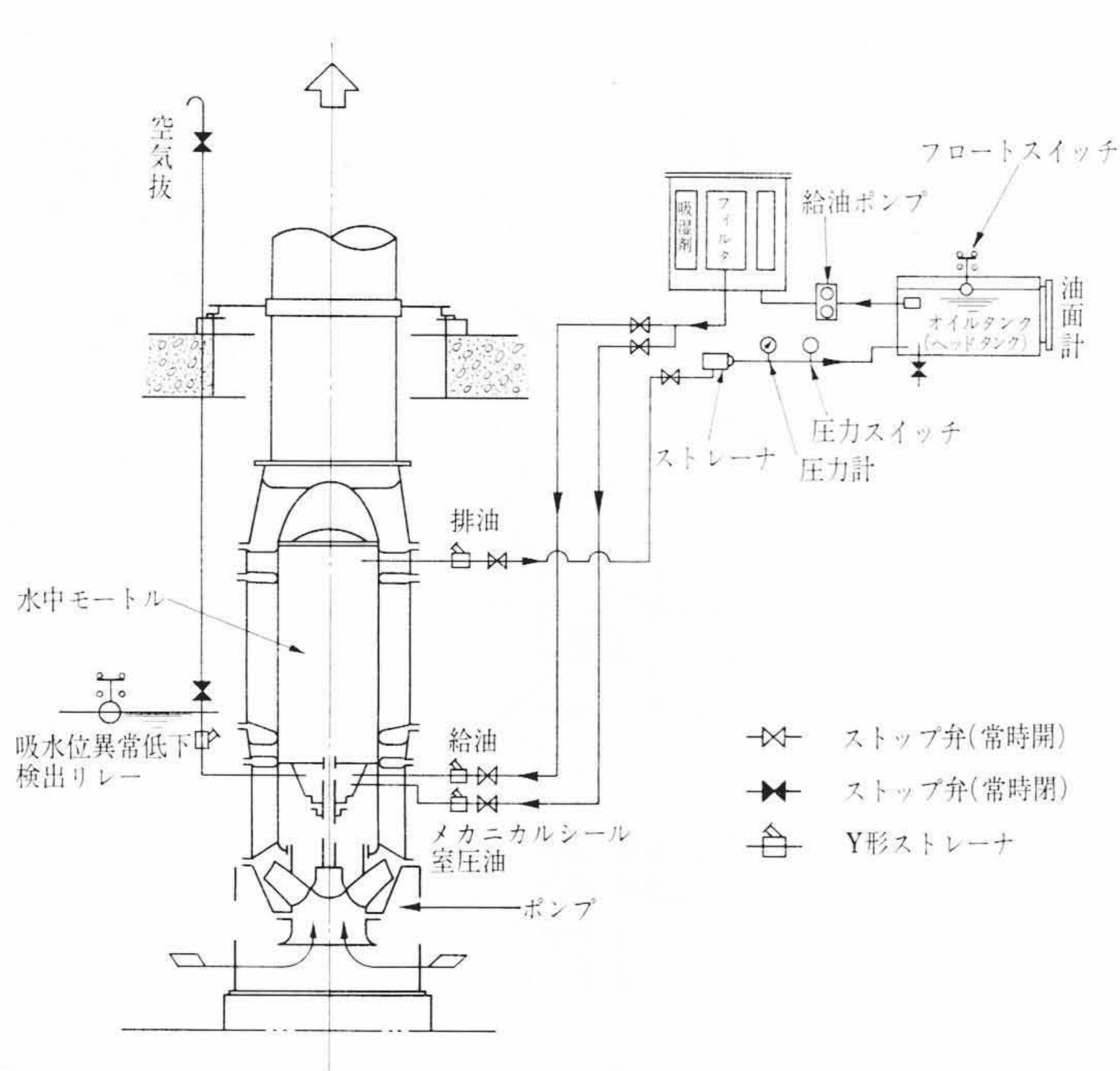


図6 油供給系統図

ルの機械的損傷を防止し、かつ液の流動損失を軽減させる目的で、コイルエンド部には非磁性円筒を設けている。

4.6 端子箱

接続端子部では外水の侵入はもちろんのこと、モータ内部の油が接続ケーブルを介して外部に漏れてはならない。本機においては特殊構造の端子箱により外部の水、内部の油の両者に対して完全なシールを施している。

4.7 防食

モータ軸、軸封装置部分のスリーブ、メカニカルシールなどにはステンレス鋼を使用し、鋳鉄製のモータケーシングには入念な下地処理と防食塗装を施している。

5. 運転保護方式

過電流継電器、接地継電器などの通常の電氣的保護装置のほかに、モータ内部への外水の侵入防止のために、つぎに述べる油圧装置および混水検知方式を採用している。

5.1 油圧保持装置と油浄化装置

図6には本機の給油系統を示している。オイルタンク（ヘッドタンク）は、洪水時の水位より高所に設置して、外水の圧力よりモータ内部の油圧を常時高めておく。さらにモータ運転時には油ポンプによりオイルタンクとモータ内部の油を循環させてモータ内部の油圧を高め、ポンプ羽根車の回転に伴う軸封装置部分に加わる外水の圧力上昇に対処している。

オイルタンク（ヘッドタンク）内にはフロートスイッチを、排油の戻り口には圧力スイッチを備えているので、水中モートルの運転、静止中を問わず外水の侵入のおそれはまったくないといえる。

また油の汙過と防湿を行なう油浄化装置が油装置に組み込まれているので、毎分、数リットル程度の油がこの装置を通過し、常に浄化された油が水中モートルに送り込まれることになる。本機では7 l/minの油を循環させているので、たとえば100 lの油は約1時間後には99%まで新鮮な油と置換されることになる。その置換率の関係は下式で示される。

$$\alpha = \left(1 - e^{-\frac{q}{Q}t}\right) \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (1)$$

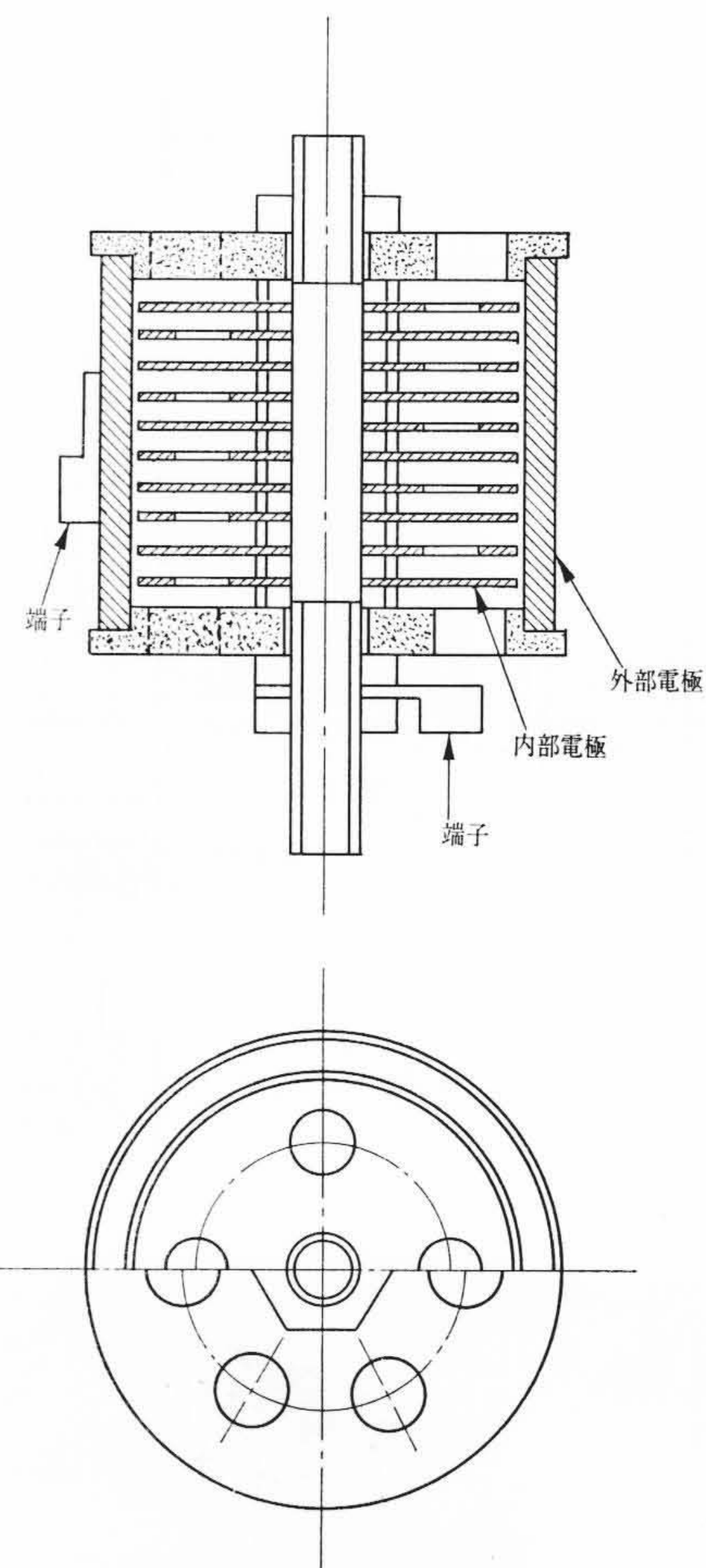
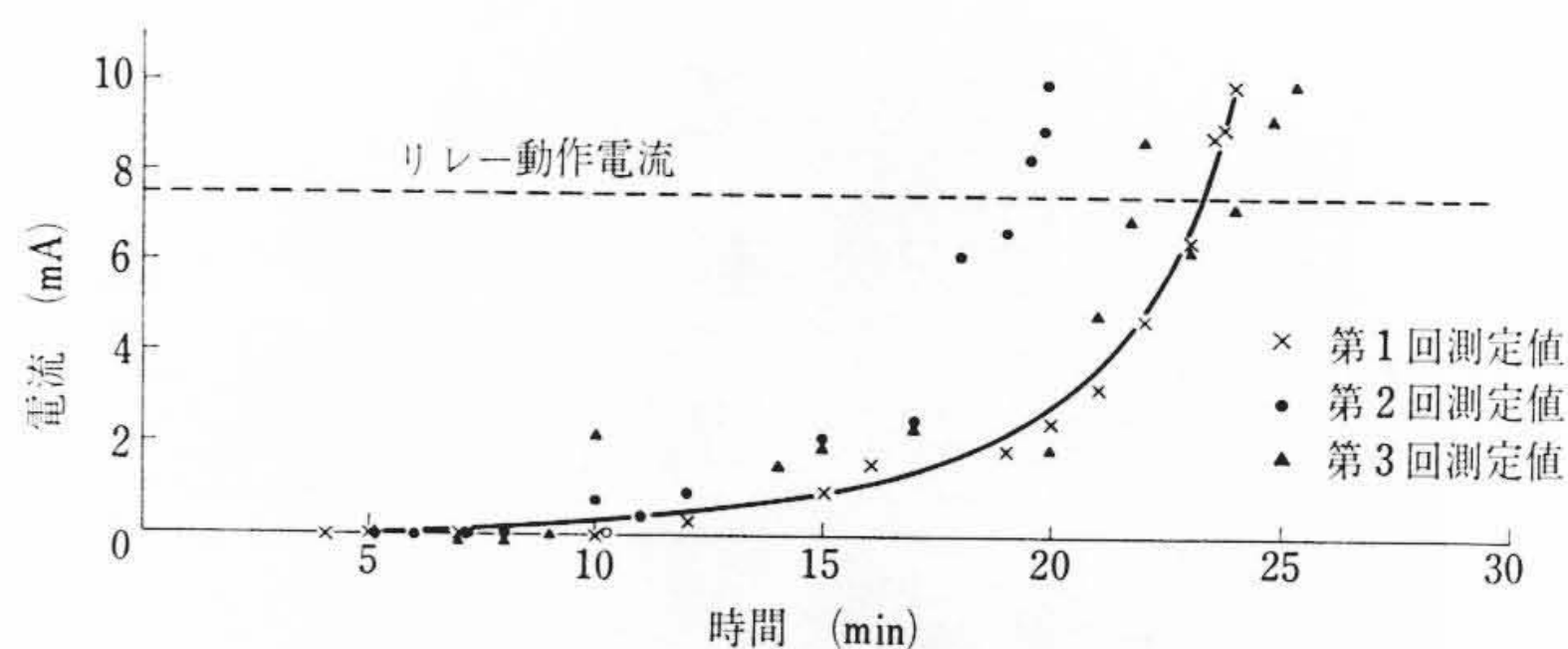
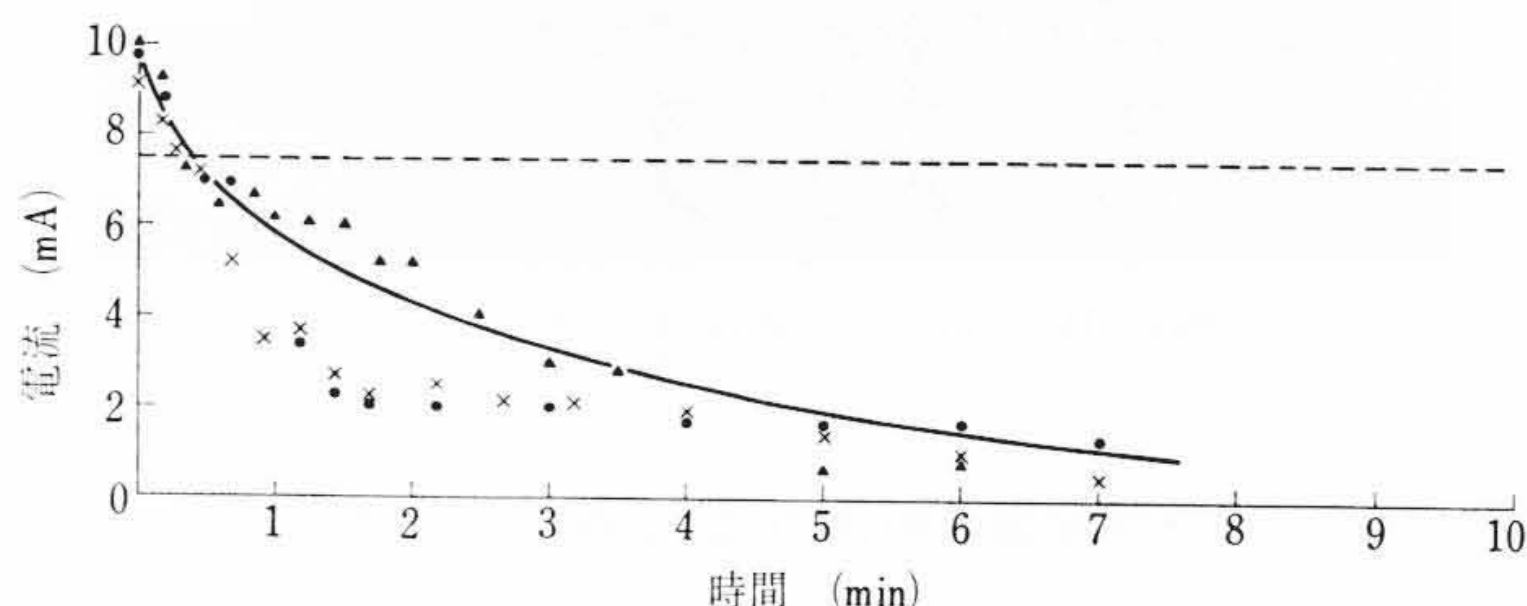


図7 混水検知器の構造



(a) 混水率0.5%の場合の動作特性



(b) 混水率0.5%動作の場合の回復特性

図8 混水検知器の動作特性と復帰特性の一例

ここに、 α ：置換率 (%)

Q ：容器（ここでは水中モートル）内の液量 (l)

q ：給液量 (l/min)

t ：経過時間 (min)

したがって長期の運転休止後に水中モートルポンプの運転を行なう場合には、あらかじめ油装置をある時間運転したのちに、水中モートルを運転すれば、モータ内部の油が浄化されるので、コイルの寿命の確保にもきわめて有益である。

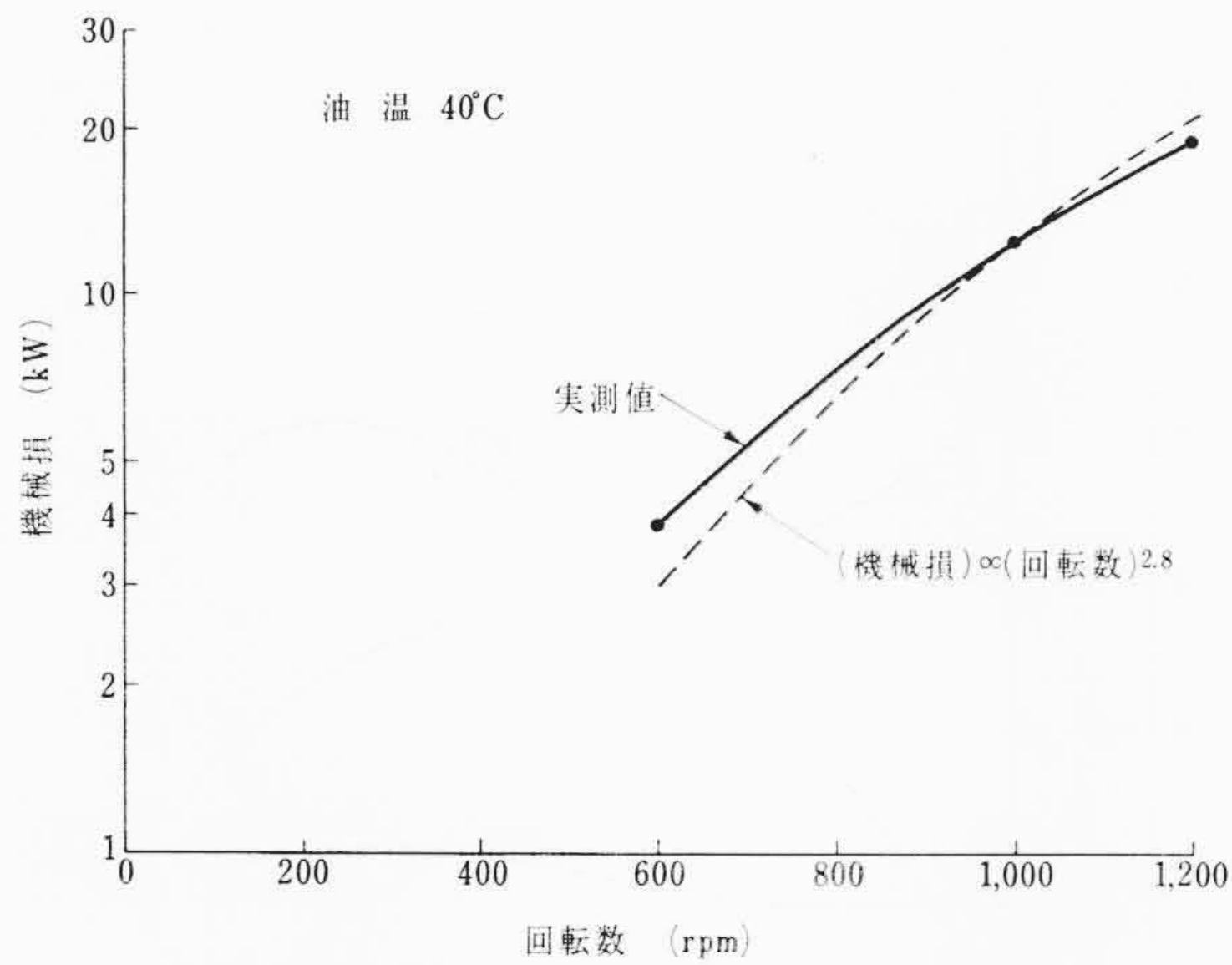


図9 油中回転に伴う回転数と機械損の関係

5.2 混水検知器の装備

軸封装置部の2重のメカニカルシールに囲まれたメカニカルシール室には、混水検知器を備えている。この継電器は常時100V程度の電圧が印加された一種の電極から成っている。図7はその構造の一例であるが、ある含水量以上に達すると油中の遊離水分が電極間に蓄積され、漏えい電流が流れ出すので混水が検知できるものである(実用新案申請中)。図8にその動作特性、復帰特性の一例を示す。

混水検知器はこのような高感度であると同時にすぐれた復帰特性を有しているので、周囲の油を水分の含まれない新しい油と入れ換えれば、継電器はふたたび元の状態に復帰する。したがって根本的な故障が水中モートルに生じていない限り、継電器の動作の都度水中モートルポンプを地上に引き上げて点検する必要はなく、地上からメカニカルシール室へ新しい油を送り込み、継電器が復帰するかを確認すればよい。

6. 油中回転に伴う機械損

水中モートルにおいては、充水式、油封入式を問わず液中の回転子の回転に伴う機械損失が全損失の大半を占めており、この機械損失の低減が大きな課題である。以下にこの問題に関して簡単に説明する。

実験によって流体内を運転する物体の抵抗 D は、流体の圧縮性の影響を無視すれば、流体の密度 ρ 、粘性係数 μ 、速度 V 、物体の基準面積 S に関係することが知られている。したがって抵抗 D は、

$$D = k \rho^\alpha S^\beta V^\gamma \mu^\delta \quad (2)$$

と書くことができる。ここで k は無次元数である。この次元方程式を作れば、

$$\frac{ML}{T^2} = \left(\frac{M}{L^3}\right)^\alpha L^{Z\beta} \left(\frac{L}{T}\right)^\gamma \left(\frac{M}{LT}\right)^\delta \quad (3)$$

となるので、 α, β, γ を δ の関数として求めれば、

$$D = k_1 \frac{\rho V^2}{Z} S \left(\frac{\mu}{\rho l V}\right)^\delta \quad (4)$$

となる。したがって抵抗係数 C_D を、

$$D = C_D \frac{\rho V^2}{2} S \quad (5)$$

で定義すれば、

$$C_D = k_1 Re^{-\delta} \quad (6)$$

となる。 k_1 は無次元の定数、 Re はレイノルズ数であり、層流に対しては $\delta = 1/2$ となり乱流に対しては $\delta = 1/5$ となる⁽⁴⁾。

つぎに流体内の回転子の外周部分の摩擦損失 W_l を考える。回転子の半径を R 、長さを L とすれば、摩擦トルク T_l は、(5)式より、

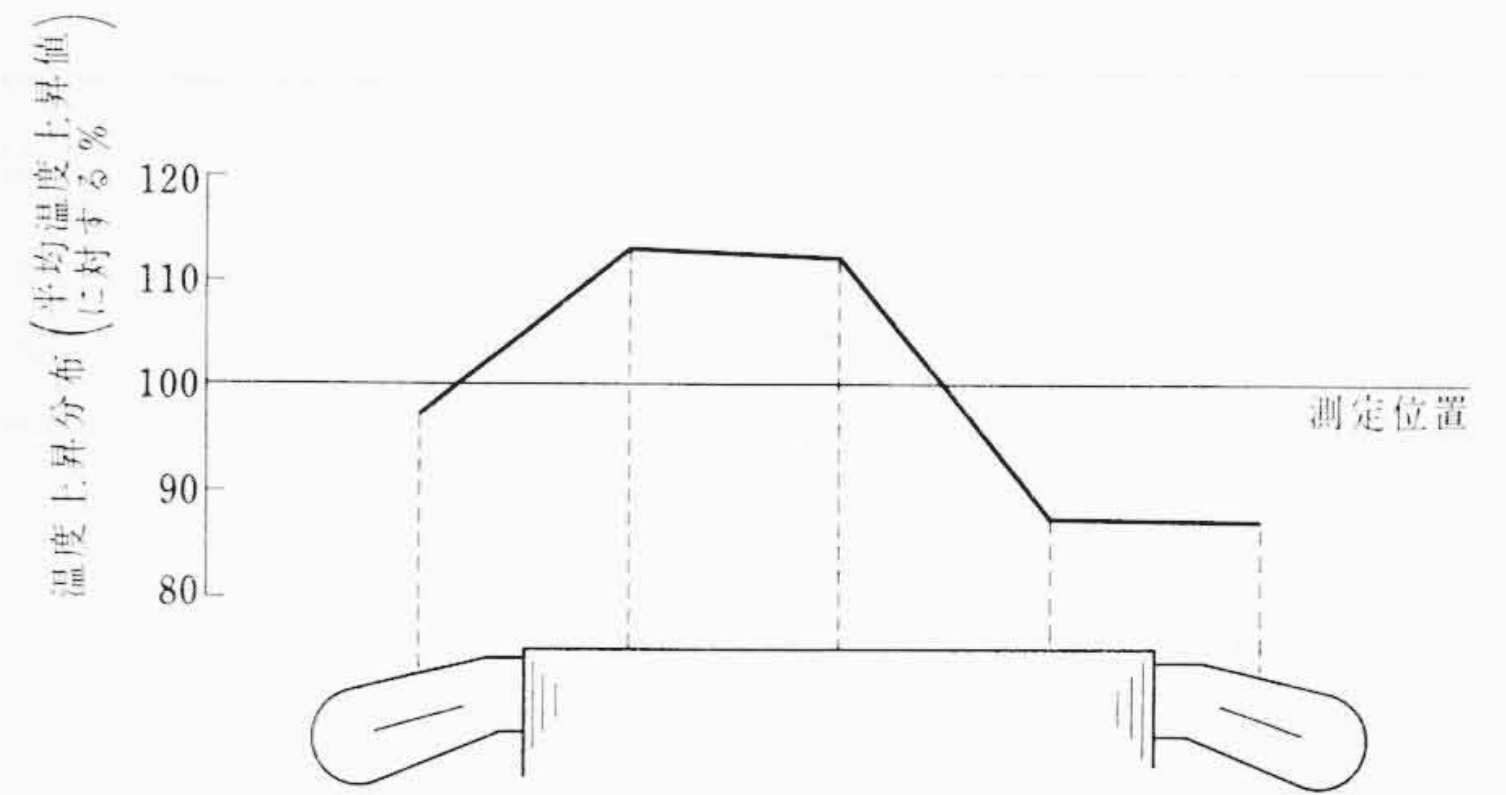


図10 定格負荷運転時の各部の温度上昇分布

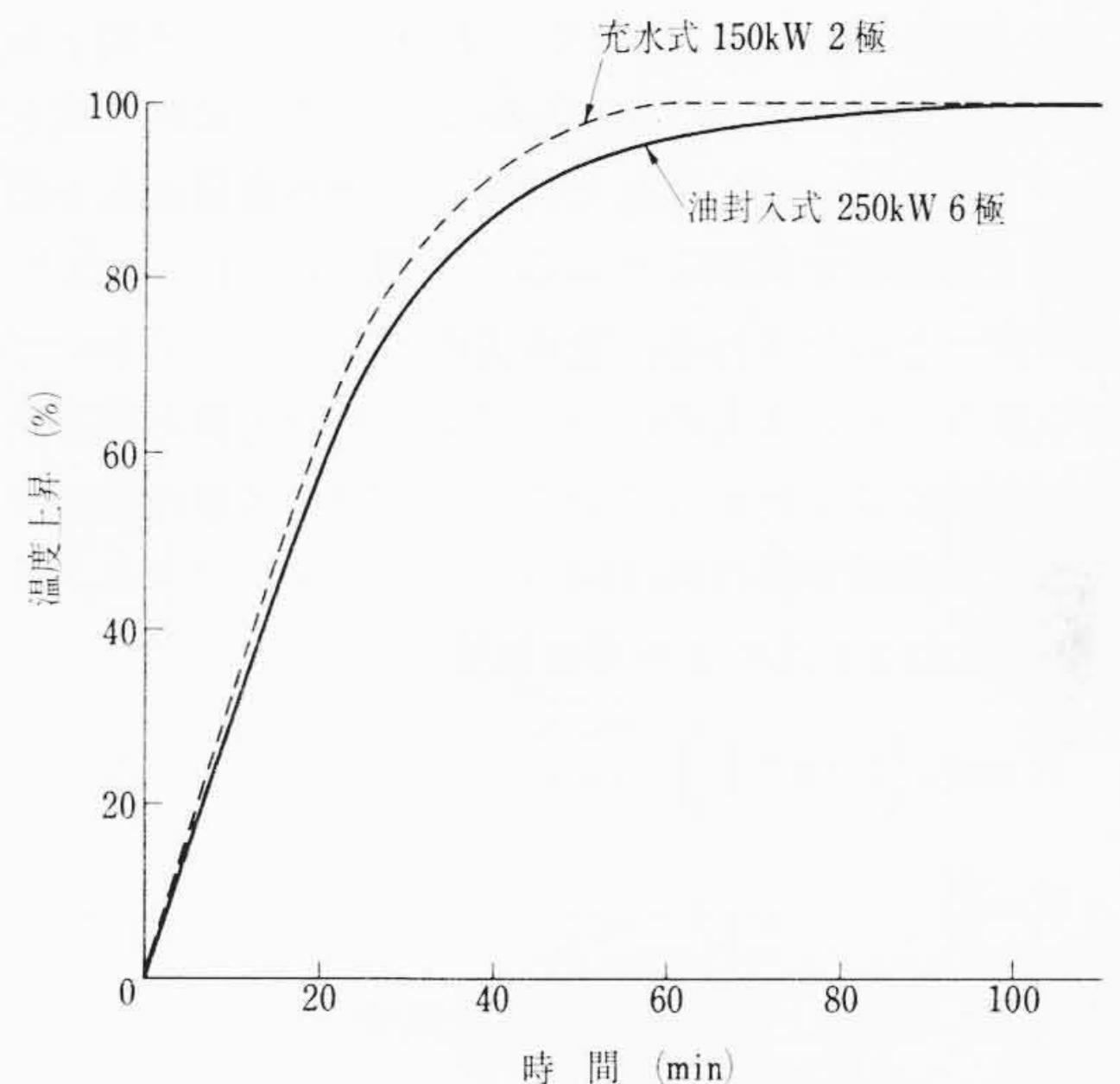


図11 水中モートルの温度上昇曲線

$$\begin{aligned} T_l &= C_D \frac{\rho V^2}{2} (2\pi RL) R \\ &= C_D \pi \rho L R^4 \omega^2 \quad (7) \end{aligned}$$

となるから、

$$W_l = T_l \omega = C_D \pi \rho L R^4 \omega^3 \quad (8)$$

となる。ここで ω は回転角速度である。

同様にして回転子側面の摩擦損失も求めることができる。

乱流域であるとすれば、(6)、(8)式より、

$$W_l \propto \omega^3 Re^{-1/5} \quad (9)$$

すなわち、

$$W_l \propto \omega^{2.8} \quad (10)$$

の関係が成り立つ。図9は回転数—機械損失の実測値の一例であるが、(10)式の関係が成立していることがわかる。また機械損失は $R^{3.6}$ に比例して増加するので、高速機になればなるほど、回転子外径を極力押え、回転子の表面を平滑にしたり、回転子と固定子間のギャップの選定などに注意を払う必要がある。固定子コイル、回転子導体の形状、配列などには十分な検討を加え、これらの条件を満足する合理的な設計を必要とする。

7. 温度上昇

水中モートルにおいては、発熱体の周囲は空気に比べて熱伝達、比熱ともに格段と大きな冷却液により囲まれており、陸上用モータに比較してきわめて冷却効果が高い。ただし大容量の水中モートルにおいては、回転子の液中回転損失を押えるために、鉄心積厚長さが非常に長いものとなる。そのため軸方向の温度分布に着目し、局部的な過熱の有無に注意を払う必要がある。図10は本機の連続定格負荷運転時の温度上昇値の分布を示したものである。もっとも温

表 1 水と絶縁油の熱的性質

物 質	温 度 (°C)	比 重 量 γ (kg/m ³)	動粘性係数 ν (m ² /s)	熱伝導率 λ (W/m°C)	プラントル数 Pr	膨張係数 β (1/°C)
水	20	998.2	1.007×10 ⁻⁶	0.599	7.03	0.00018
	60	983.2	0.478	0.651	3.01	0.00054
	100	958.3	0.294	0.681	1.74	0.00078
絶 縁 油	20	866	36.5	0.125	481	0.00069
	60	842	8.7	0.122	126	0.00070
	100	818	3.8	0.119	60.3	0.00072

(機械工学便覧による)

度上昇の高い個所は、鉄心積厚中央部分であるが、平均温度上昇より 10% 高い程度にとどまっており、各部にわたり予期どおりの適切な冷却が行なわれていることがわかる。つぎに油封入式と充水式の水中モートルについて、冷えた状態より定格負荷運転を行なった場合の温度上昇曲線を実測してみると、図 11 のようになり、熱時定数がほぼ同一とみなされる。充水式水中モートルにおいては、容量がかなり異なっているものについても、熱時定数が同じであることが従来の実績によりわかっているのです、同一容量の場合でも油封入式と充水式の熱時定数はほぼ同一ということが出来る。また温度上昇 θ_t の一般式は下式により示される。

$$\theta_t = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \dots\dots\dots (11)$$

$$T = \frac{C}{F} \dots\dots\dots (12)$$

- ここに、 θ_t ： 温度上昇の最終値（最高値）
- T ： 熱時定数
- C ： 発熱体の熱容量
- F ： 単位時間あたりの放熱量
- t ： 経過時間

したがって充水式と油封入式との冷却効果もほぼ同一であることがわかる。水と絶縁油の熱的性質を比較すれば、表 1 のとおりであり、かなりの相異が認められる。また油封入式の場合には、充水式の場合と異なり地上より多少なりとも油を循環しているのです、冷却上やや有利という相異もある。しかし前述のように、両者には冷却効果の差が認められないことからわかるように、熱伝導率などの差はほとんど無視できる程度まで、発熱体表面の流速が十分に保たれていることがわかる。

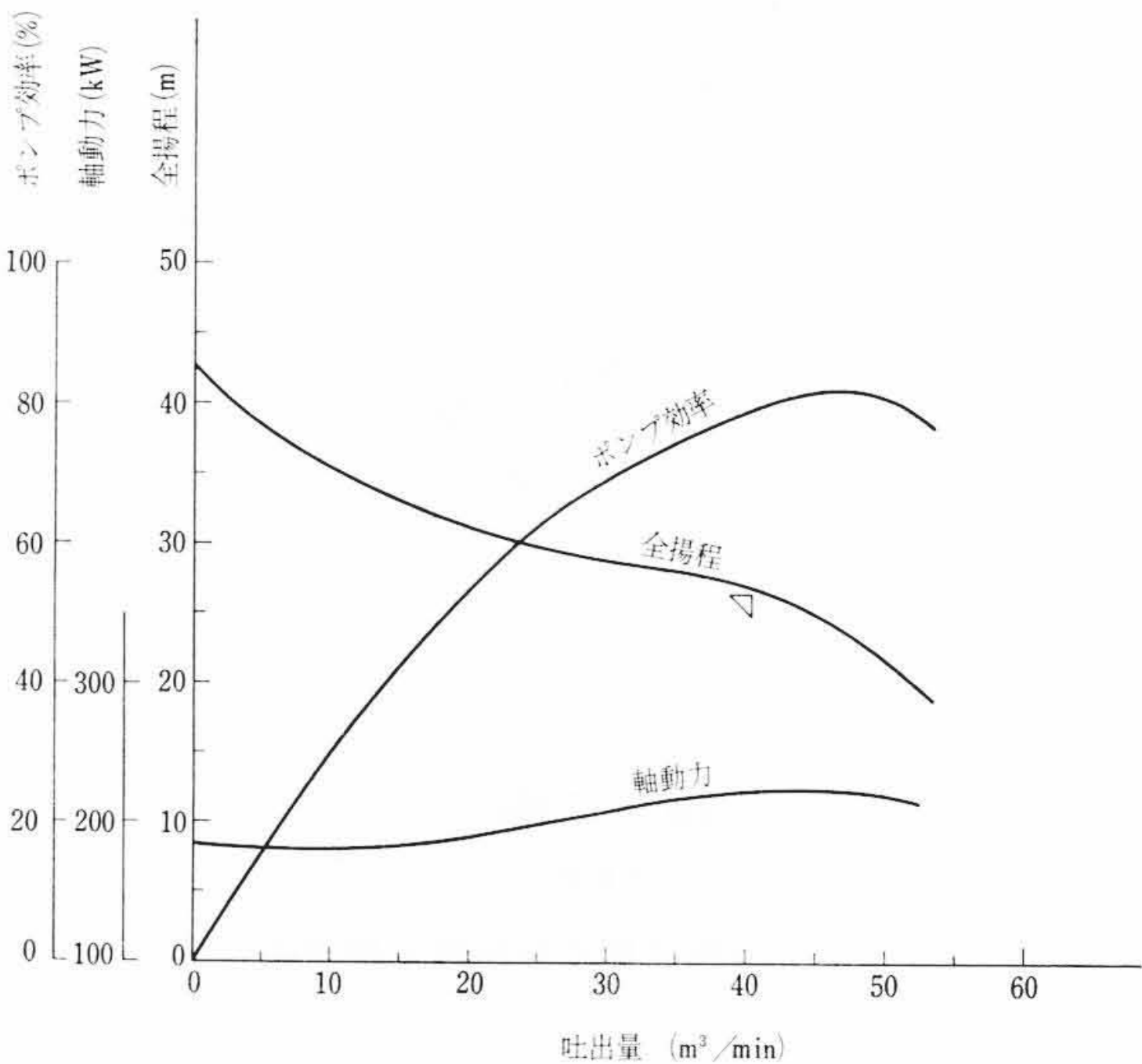


図 12 250 kW 油封入式水中モートルポンプの性能曲線

8. 特 性

このたび完成した水中モートルポンプの、モータ単独効率は定格負荷時 89% であった。陸上用モータの効率 90~93% と比較して多少劣るが、水中モートルとしてはきわめて満足すべき数値である。また静止時 7.5 kg/cm² 40 分、運転時 5.0 kg/cm² 2 時間の油圧試験を行なったが、モータ本体、端子箱部分はもちろんのこと、メカニカルシール部分からの油漏れもまったく認められなかった。ポンプとの組合せ試験時には、ポンプ効率、揚程などのポンプ性能以外に、振動、コイルの温度上昇、絶縁抵抗など詳細にわたり測定したが、予期どおりの成果を収めることができた。図 12 はポンプの性能曲線である。

9. 結 言

記録的大容量の 250 kW 油封入式水中モートルポンプの概要を、信頼性、性能上の問題を中心に紹介した。このようにモータとポンプが有機的に組み合わせられる方式は、経済的にも取り扱い上もきわめて有利なので、今後その用途はますます拡大するものと思われる。

参 考 文 献

(1) 篠田：日立評論 46, 294 (昭 39-2)
(2) 大和田、鎌田：日立評論 47, 500 (昭 40-3)
(3) 綿引、篠田、大和田：日立評論 47, 1832 (昭 40-11)
(4) 岡本哲史：応用流体力学, 66-68 (昭-28 誠文堂新光社)