

4. 潜水調査船用油漬均圧型交流電動機の試作試験

萩原 右門*¹ 徳永 三伍*¹ 對馬 克己*¹ 黒川 武彦*² 鶴野 秀之*³

現在、海洋科学技術センターで、開発中の2,000 m潜水調査船の推進制御方式は、各種方式の得失を検討、評価し、また全体として小形軽量化をはかるため、インバータ制御方式による油漬均圧型交流電動機を使用することとしている。しかし、2,000 mの海底では通常の電動機の使用環境に比べ、全く特殊な環境であり、また電源がインバータであるため、波形が正弦波でないことから、電氣的、構造的に特別な考慮を払い、電動機はもとより、システムの設計および製作を行う必要がある。このため、主推進用の油漬均圧型交流電動機と同一の仕様の電動機を試作し、高圧下および常圧下における各種試験を行い、効率の把握、シール機構、均圧機構等構造の確認などの設計および製作上のデータを得た。

Full Scale Test of an Oil-Filled Pressure Compensated AC Motor for a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle

Umon Hagiwara*⁴, Sango Tokunaga*⁴, Katsumi Tsushima*⁴,
Takehiko Kurokawa*⁵, Hideyuki Tsuruno*⁶

In a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle (DSV-2K), oil-filled pressure compensated AC motors driven by DC-AC inverters are to be installed in order to lessen the size and the weight. This was determined after investigation and evaluation of the merits and demerits of every type of motor.

Because the environment of the ocean bottom at a depth of 2,000 m is quite different from the normal environment for motors, in addition to the fact that the electricity is a non-sinusoidal wave since it is delivered from a DC-AC inverter, motors should be designed and manufactured to include the inverter system with special consideration for electricity and mechanism.

Therefore, in this study the oil-filled pressure compensated AC motor was manufactured with the same specifications as the main propulsion motor. Under the conditions of high pressure and normal pressure many types of tests were carried out.

Data for design and manufacture; efficiency seal mechanism, and pressure compensation mechanism were obtained from these tests.

*¹ 深海開発技術部

*² 三菱重工業株式会社神戸造船所

*³ 三菱電機株式会社長崎製作所

*⁴ Deep Sea Technology Department

*⁵ Kobe Shipyard & Engine Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

*⁶ Nagasaki Works, Mitsubishi Corporation

1. ま え が き

現在、海洋科学技術センターで、開発中の2,000 m潜水調査船（以下“潜水船”という）の推進制御方式は、各種方式の得失を検討評価し、また全体として小形軽量化をはかるため、インバータ制御方式とし、油漬均圧型交流電動機を使用することとしている。すなわち、潜水船の電動機は小形軽量および高効率であると同時に、本潜水船では船外に電動機を装備するなどのため、高圧海水中での耐圧力性、耐腐食性、高信頼性等が要求される。

これらの要求を満すため、潜水船の電動機は、構造が簡単でメンテナンスが容易な油漬均圧方式かご形誘導電動機を採用した。しかし、2,000 mの深海は通常の電動機の使用環境に比べ、全く特殊な環境であること、また電源がインバータであるため、波形が正弦波でないことの2点について、電氣的、構造的に特別な考慮を払って設計する必要がある。

この設計手法の妥当性を確認し、実用機でよりすぐれた電動機の設計、製作を目的とし、主推進用電動機と同一の仕様の電動機1台を試作し、高圧下および常圧下における各種試験を行い、効率の把握、シール機構、均圧機構等の構造の確認など、設計および製作上のデータを得た。

なお、本試験にあたり、“潜水調査船開発研究会”の委員各位から適切なお助言、ご指導を賜わり、深く謝意を表する次第である。

2. 試作機の概要

2.1 試作機の選定

潜水船に搭載される電動機は、主推進用1台、補助推進用2台、海水ポンプ用1台、および油圧ポンプ用1台の計5台である。試作機として、構造的に最も複雑で出力が大きく、かつ制御回転数の範囲が広い、主推進用電動機を選定した。

本電動機の仕様を表1、またその構造を図1に示す。

2.2 電動機回転数

重量および寸法を小さくするため、電動機は、定格回転数3060 rpm（周波数105 Hz、4極）の高速回転とし、遊星歯車方式による減速機を内蔵させ、プロペラの必要回転数170 rpmを得ることとした。

遊星歯車方式による減速機は、入力軸と出力

表1 試作電動機の仕様
Specifications of the motor

形 式 Type	油漬均圧形かご形三相誘導電動機 Oil-filled 3-phase induction motor
定 格 出 力 Rating output	4 kW
定 格 電 圧 Rating volt	AC 3φ, 85 V
定 格 周 波 数 Rating freq.	105 Hz
極 数 Pole	4
定 格 回 転 数 Rating revolution	3060 rpm
絶 縁 種 別 Insulation	F
軸 受 Bearing	コロガリ軸受 Roller bearing
減 速 機 Reduction gear	遊星歯車 Planetary gear

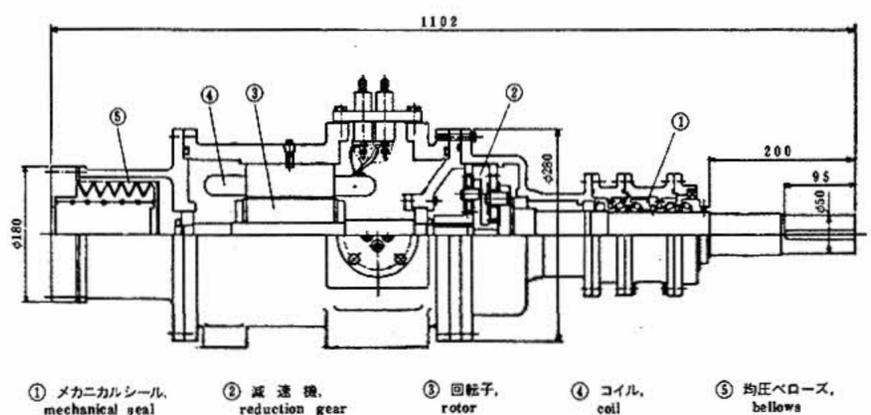


図1 試作電動機の構造
Mechanical loss of the motor

表2 封入油の性状
Properties of filling oil

項 目 item	MIL-H 5606 相当油 oil
比 重 20/4℃ specific gravity	0.8684
粘 度 [CS] 37.8℃ viscosity	1443
粘 度 指 数 viscosity index	224
体 積 抵 抗 率 [Ω-cm] volume resistivity	9.4×10^7

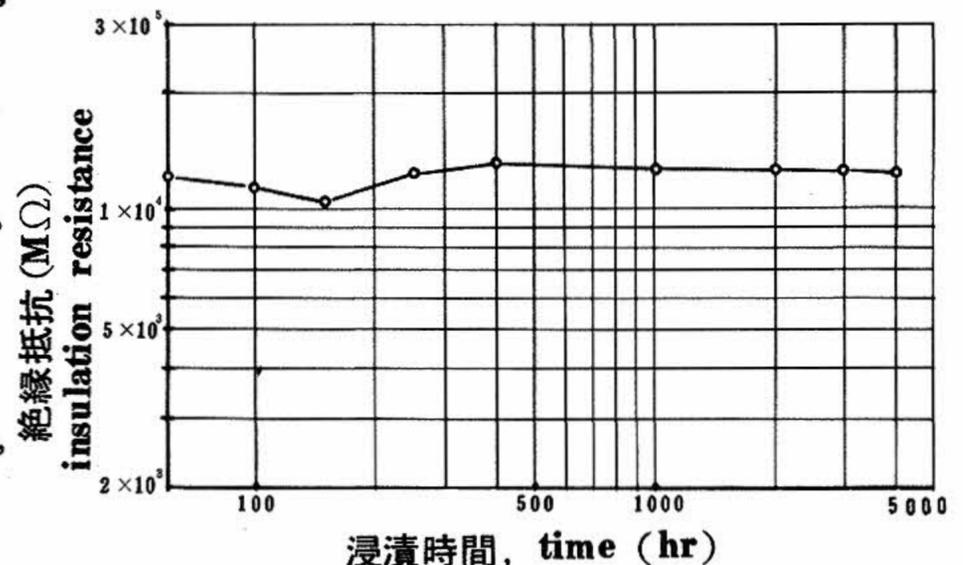


図2 油中における絶縁抵抗の経時変化
Transition of insulation resistance of coil preserved in oil

軸が同一軸上に配置され、小形で大きな減速比が得られる。

2.3 ケーシング材

電動機が均圧型であることを考慮し、軽量化のため、電動機のケーシング材はアルミニウム材を用いることとした。材料は耐食性にすぐれ、また機械的性質の良いアルミニウム合金鋳物（JIS H 5202のAC7A-F材）を採用した。

またアルミニウム材は熱伝導率が高く、有効な冷却効果が得られるため、より小形化が可能である。

2.4 耐圧力性

電動機のケーシング内に油を満たし、ケーシング端部に設けたニトリルゴム製ベローズで内外の圧力を均圧させる構造とした。

ベローズの容積は封入油の深度圧による体積収縮、温度上昇による体積膨張を補償するに十分な容量とした。

2.5 シール

電動機各部のシールには、Oリングを使用し、圧力による断面積の縮小を考慮し、リングの溝の寸法を決定した。

軸貫通部のシールは、均圧型のため、内外の圧力差が存在しないことから、シール性能のすぐれたメカニカルシールを採用した。さらにシールの信頼性の向上のため、メカニカルシールをタンデムに設け、ダブルシール構造とした。

2.6 回転子

電動機の損失には、鉄損、銅損、機械損等がある。油漬電動機では機械損が最も大きい。これは回転子と固定子間に油があるため、フリクションロスが通常の電動機に比し、きわめて大きいことによるものである。

あるギャップを持った回転円筒のロスは、次式で表わされる。

$$P_L = K \left(\frac{\nu}{\delta} \right)^{0.2} \cdot \rho \cdot D^{3.8} \cdot \omega^{2.5} \cdot L \dots (1)$$

ここに P_L ; ロス

K ; 定数

δ ; ギャップ

ν ; 流体の動粘性係数

ρ ; 流体の密度

D ; 回転子の直径

ω ; 回転角速度

L ; 回転子の長さ

上記式から次のことが言える。

- (1) 回転円筒のロスは、ギャップ δ が小さくなると、その0.2乗に反比例して急激に増加する。

誘導電動機は力率を良くするためギャップを狭くする必要があり、したがってギャップの取り方が効率に大きな影響を与える。

- (2) ロスは回転子長さ L および回転子直径 D の3.8乗に比例する。

したがって回転子はなるべく小さい方がロス減少に効果がある。

- (3) この式は、回転体の表面が滑らかな場合にのみ適用できるものである。

表面が荒い場合は極端にロスが大きくなることは容易に想像できる。

以上の諸点によって、回転子と固定子のギャップは、力率の関連で最適の値とし、回転子はできるだけ細くするとともに、回転子表面は、通常の半閉スロットではなく、クローズドスロットを採用し、固定子表面についても極力滑らかな表面とした。

2.7 封入油

(1)式から回転円筒のロスは、粘度変化の0.2乗に比例する。したがって電動機内部に封入する油は低粘度のものが好ましく、本電動機はMIL H 5606相当の低粘度の航空機用作動油を採用した。封入油の性状を表2に示す。

2.8 固定子コイル

コイルは高圧油中で絶縁劣化を起こさないものでなければならない。

変圧器等に用いる絶縁油に対する耐油性には多くの報告がある。今回のように、航空機用作動油（以下、“作動油”という）に対する耐油性や高圧中の耐圧力性の資料はない。したがって本試作電動機の製作に先立って、これらの特性を調べた。

2.8.1 耐油性

コイルを作動油中におき、通電状態で4,000 hr以上の油中浸漬試験を行った。

今回、使用するコイルの油中浸漬試験の結果を図2に示す。

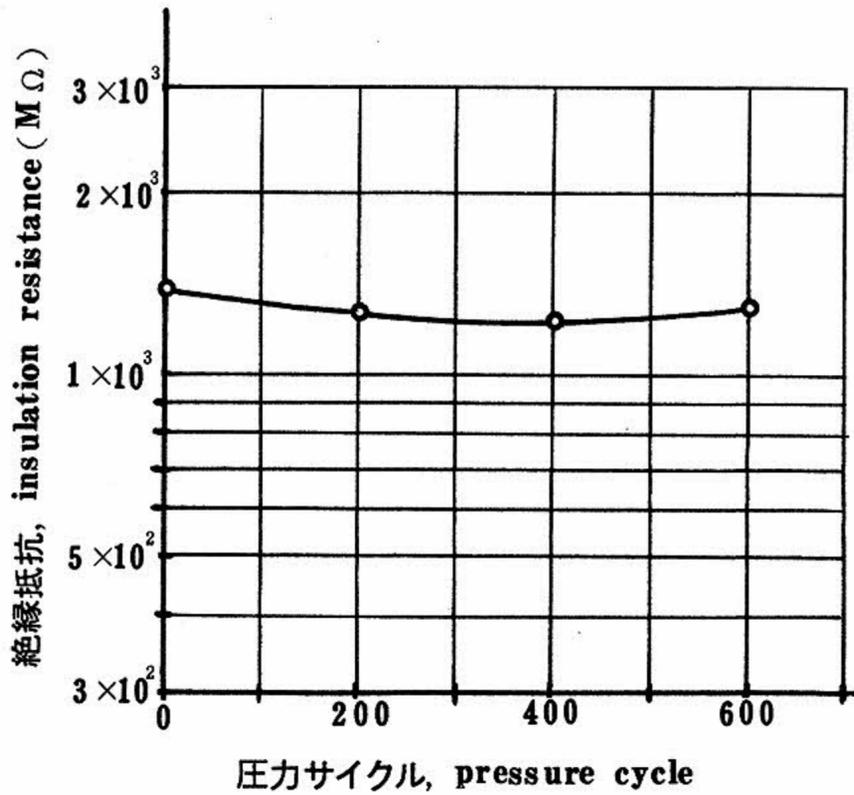


図3 圧力サイクルとコイルの絶縁抵抗

Insulation resistance of coil under cycle pressure

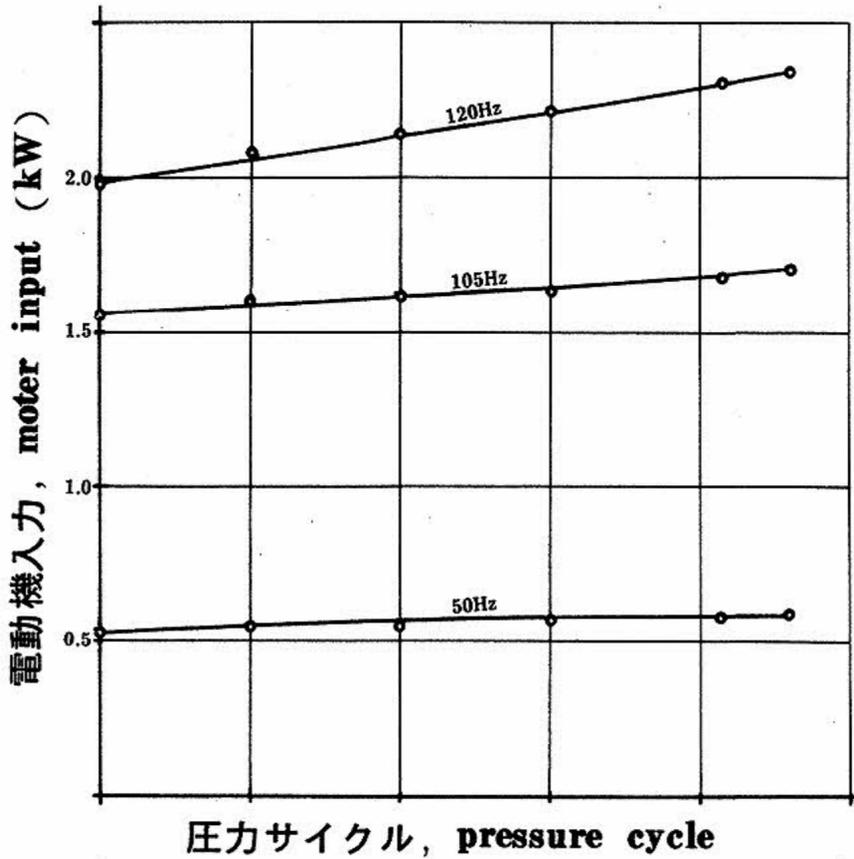


図4 電動機無負荷特性

Characteristic curve of the motor (no load)

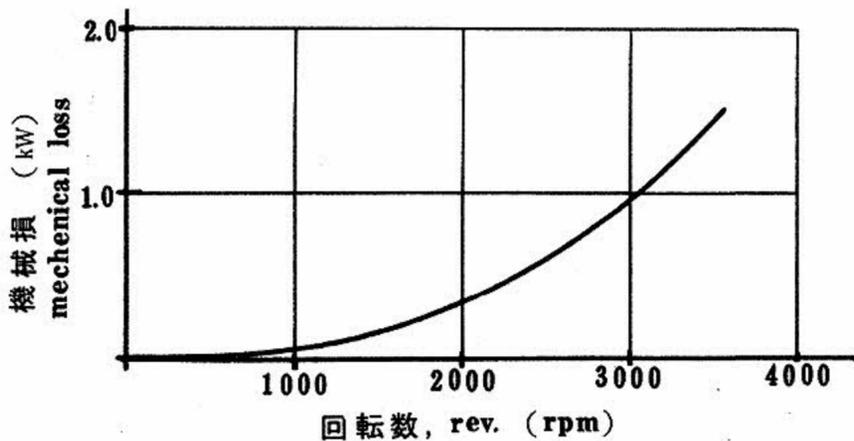


図5 電動機の機械損

Mechanical loss of the motor

200 hrまでは絶縁が低下する傾向がみられる。しかし、絶縁抵抗値は 10^4 MΩ以上であり、絶縁性能として十分な値である。200 hr 経過後、絶縁性能は回復し、1,000 hr 以後は全く安定した状態となっている。

これによって、コイルの耐油性は、全く問題がないことを確認した。

2.8.2 耐圧力性

コイルを作動油で満した高圧タンク内に置き、圧力0 ~ 311kgf/cm²、昇圧速度毎秒25kgf/cm²、降圧速度毎秒40kgf/cm²という過酷な条件下で、600回の圧力サイクル試験を行った。本試験での絶縁抵抗の変化を図3に示す。

試験前と試験後との絶縁抵抗値の差はほとんどなく、実用上全く問題がない。

3. 試験方法および試験結果

上記の検討後、電動機を製作し、以下の諸試験を実施した。

3.1 高圧下水中特性試験

3.1.1 耐圧力性

- (1) 無通電の電動機を水中に置き、207kgf/cm²の圧力を15 min 加える。この試験を10サイクル繰り返す。
- (2) 電動機を105 Hzで無負荷運転した状態で上記(1)と同様の試験を行う。
- (3) 無通電の電動機を水中に置き、311kgf/cm²の圧力を10 min 加える。
- (4) 電動機を105 Hzで無負荷運転した状態で、上記(3)と同様の試験を行う。

以上の各試験でも、電動機に油漏れや変形はなく、巻線および封入油共に、絶縁抵抗の低下は認められなかった。

3.1.2 無負荷試験

常圧、50kgf/cm²、100kgf/cm²、150kgf/cm²、207kgf/cm²および230kgf/cm²の各圧力下で、電動機を無負荷で運転し、圧力による入力の変化を計測した。この結果を図4、回転数による機械損の変化を図5に示す。

図4では、封入油の攪拌ロスが圧力によって増大することがわかる。また図5の曲線では(1)式の回転円筒の角速度とロスとの関係がよく一致していることを示している。

3.1.3 連続運転試験

230 kgf/cm²の圧力下で、105 Hz および 120 Hz で運転した。正転-逆転を30minごとに繰返し、延べ8hrの連続運転を行った。巻線および封入油の絶縁抵抗並びに電動機の温度上昇には異常のないことを確認した。

3.1.4 開放点検

高圧下水中特性試験終了後、電動機を分解した結果、各部共に、変形等の異常は認められなかった。また電動機本体内部への水の浸入は全く認められず、メカニカルシールは十分な機能を有していることが確認された。

3.2 常圧下水中特性試験

3.2.1 負荷試験

実用機と同様の可変電圧-可変周波数のインバータ電源を用い、周波数を変化させ、それぞれにおける負荷特性を調べた。電動機の定格における結果を表3に示す。

この表によれば出力性能を満足していることがわかる。また、効率について、“2. 試作機の概要”で述べた諸対策を施した結果、70%弱の効率を確保することができた。

3.2.2 水中温度試験

常圧水中において電動機に定格負荷をかけて運転し、各部の温度変化を測定した結果、巻線で12 deg., 封入油で5 deg. およびギヤケースで5 deg.の温度上昇があった。

本電動機の絶縁はF種であり、温度上昇の点では十分な余裕を持っていることが確認できた。

3.2.3 空气中温度試験

試験等のため、電動機を母船上などの空气中で短時間運転することを想定し、空气中において定格電圧および定格周波数で10 min 無負荷運転を行い、各部の温度変化を計測した。その結果、巻線で12 deg., 封入油で10 deg., およびギヤケースで7 deg.の温度上昇があり、十分な余裕を持っていることが確認できた。

3.2.4 連続耐久試験

常圧水中で電動機に定格負荷をかけた状態で、10⁴ hrの連続運転を行った。

運転後の絶縁抵抗試験および絶縁耐力試験(AC 1500 V, 1 min)でも、絶縁抵抗の低下もなく、異常は認められなかった。

3.2.5 開放点検

連続耐久試験終了後、電動機を分解し、各部の点検を行ったが、変形等の異常は認められなかった。

また電動機本体内部の水の浸入は全く認められず、メカニカルシールは十分な機能を有していることが確認された。

4. 考 察

4.1 効 率

電動機の効率は定格状態で約70%弱が確保できた。

日本工業規格等で、規定されている同程度の性能の3相がご形誘導電動機の効率が80~82%程度であるので、本電動機の場合は封入油によるフリクションロスが10%程度の増加したことになる。

今回の試験では、高圧試験設備の関係上、高圧水中における負荷試験ができなかった。しかし常圧下と高圧下における相違は圧力による封入油の粘度の変化、すなわち電動機の機械損の変化と考えられる。

このため、“3.1.2 無負荷試験”(高圧下)の結果から常圧下と207 kgf/cm²の圧力下との電動機入力差は、周波数105 Hz の場合には約0.1 kwとなる。したがって、“3.2.1 負荷試験”(常圧水中下)の結果、この機械損の増加分を加えれば、高圧下における負荷運転時の効率が推定できる。

表3から105 Hz の場合を計算すると、

$$\left(\begin{array}{l} \text{圧力 } 207 \text{ kgf/cm}^2 \text{ にお} \\ \text{ける定格負荷時の効率} \end{array} \right) = \frac{4.00}{5.81+0.1} \times 100 = 67.7(\%)$$

となる。

常圧中の効率が68.8%であるので、高圧水中では約1~2%の効率低下があるものと思われる。したがって実用機としての電動機用インバータの設計では、この結果を考慮する必要がある。

4.2 構 造

今回の試作電動機は、高圧水中で無負荷で延べ200 hr以上運転をしたのち、常圧水中で100 hrの連続耐久試験を行い、メカニカルシール、均圧機構、軸受潤滑、巻線の絶縁、減速機等に全く異常は認められなかった。したがって構造上、今回の試作機設計方針が間違いないことが確認された。

表3 電動機負荷特性 (定格時)
Characteristic of the motor (Rating load)

周波数 frequency [Hz]	回転数 rev. [rpm]	電圧 electric pressure [V]	電流 current [A]	入力 input [kW]	出力 output [kW]	効率 efficiency [%]	力率 P.F. [%]
105	3052	92.0	50.2	5.81	4.00	68.8	72.6

4・3 温度上昇

電動機の温度上昇はきわめて低く押えることができた。

本試験の結果、実用機の空気中での運転の許容時間は電源のインバータの空気中での運転許容時間によって制限されることが予想される。

5. あとがき

今回の試作試験で、高圧水中における油漬均圧型かご形誘導電動機が、構造的、かつ電氣的に十分な性能を発揮できることが実証された。

電動機の出力が小さい場合は、わずかな損失の増加も、効率に大きく影響する。今回の試作機で定格出力時70%弱の効率が確保できたことは大きな成果であった。

この試作機のデータを生かし、潜水船に装備す

る実用電動機を、より高性能なものとするこにつとめたい。

文 献

- (1) 中林功一, 1974, "偏心回転二重管流れと潤滑問題", 潤滑 19(5), 367
- (2) 和田義彦ほか, 1974, "大型水中モートル", 三菱電機技報 48(10), 1164
- (3) (財)日本船用機器開発協会, "6000m深海潜水調査船の開発研究事業報告書" 47-35 (1973), p. 510
- (4) JIS H 5202, 1971, アルミニウム 鋳物