

2. 潜水調査船用インバータの試作試験

萩原 右門*¹ 坂倉 勝海*¹ 徳永 三伍*¹

對馬 克己*¹ 黒川 武彦*² 朝枝 健明*³

現在、海洋科学技術センターで開発中の 2,000 m 潜水調査船の電源は、酸化銀-亜鉛アルカリ電池 (108 V) である。主推進および補助推進用の電動機並びに海水ポンプおよび油圧ポンプ駆動用の電動機の運転および制御は、VVVF (電圧-周波数可変) 方式のトランジスタインバータ、また、通信、航海機器等の電源供給は、CVCF (定電圧-定周波数) 方式のトランジスタインバータを採用することによって、電源システムの小形軽量化をはかり、電力消費を合理的に制御している。

これらのシステムは、近年のパワーエレクトロニクスの進歩によって、10 kVA 程度のインバータの主回路に使用できる大電力トランジスタの製作が可能となり、高性能なインバータが開発されたため実現したものである。

2,000 m 潜水調査船用のインバータは、小形軽量化をはかるため、特殊な形状の耐圧容器に高密度に実装し、さらに、有効な冷却法を考慮するなど、特殊な条件が要求される。このため、試作インバータとして、推進用インバータおよび通信用インバータの各 1 基を試作し、各種試験を実施し、さらに小形軽量化のための実装方法および冷却方法の検討を行うとともに、効率の把握、信頼性の確認等を行い、所期の成果を得た。

Test of an Experimental Inverter for a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle

Umon Hagiwara*⁴, Katsumi Sakakura*⁴, Sango Tokunaga*⁴
Katsumi Tsushima*⁴, Takehiko Kurokawa*⁵, Takeaki Asaeda*⁶

The electric power source of a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle (DSV-2K) is the oxide Ag-Zn alkaline battery (108 V).

The electric motors of the main thruster, auxiliary thrusters, seawater pump, and hydraulic pump are driven and controlled by VVVF (variable voltage and variable frequency) transistor inverters; and the electricity supply for communication and navigation equipment, etc., is from CVCF (constant voltage and constant frequency) transistor inverters. By adopting these transistor inverters, it is seen that by making the electricity systems smaller and lighter, the electricity consumption becomes minimized.

*¹ 深海開発技術部

*² 三菱重工業株式会社神戸造船所

*³ 三菱電機株式会社神戸製作所

*⁴ Deep-sea Technology Department

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

*⁶ Kobe works, Mitsubishi electric Corporation

These systems have been realized because the manufacturing of jumbo transistors which can be used for the main circuit of a large inverter (about 10 kVA) became feasible, and a high performance inverter has been developed due to the recent advancement in power electronics.

These inverters for the DSV-2K must satisfy special performance levels such as high density installation in the pressure vessel, effective cooling, etc. Therefore, in this study an inverter for thrusters and an inverter for general use were manufactured. Investigations of a cooling method and an installation method for rendering the inverters small and light as well as measurements of efficiency and confirmation of reliability, etc., were carried out.

The expected results were obtained through these tests.

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。）のエネルギー源は、酸化銀-亜鉛アルカリ電池（108 V）である。この直流電源を各々の負荷に適したものに交換、制御するとともに、電源システム全体としての小形軽量化および合理的な電力の使用をはかるため、次の 6 台のインバータを 3 個のインバータ容器に収納し、潜水船に装備する計画である。

(1) 推進用インバータ容器：

(a) 主推進用インバータ

負荷：誘導かご形電動機 1 台

(b) 補助推進用インバータ

負荷：誘導かご形電動機 2 台

(2) 動力用インバータ容器：

(a) 海水ポンプ用インバータ

負荷：誘導かご形電動機 1 台

(b) 油圧ポンプ用インバータ

負荷：誘導かご形電動機 1 台

(3) 通信用インバータ容器

通信インバータ（負荷：制御；通信，航海等一般電源）

交流：115 V，60 Hz，単相

直流：28 V

現在の静止型インバータは、一般に主回路にサイリスタを用いたものが大部分であり、このようなインバータは入力が直流の場合には転流回路を必要とし、主回路部分が非常に複雑になる。

一方、近年のパワーエレクトロニクスが進歩によって電流容量が大きく、かつ安全作動領域の広い

大電力トランジスタの製作が可能となった。このトランジスタをインバータの主回路に用いた場合、入力が直流の場合でも転流回路が不要で小形軽量となり、高効率のインバータの製作が期待できる。

今回の試作試験では、主回路および制御方式が異なっている上記(1)および(3)のインバータを試作し、それぞれの性能を確認するとともに、チタン合金製耐圧容器への高密度実装方法およびその冷却方法の確立をはかった。

写真 1 はインバータ内部実装状態、写真 2 は採用した大電力トランジスタを示す。

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ご助言、ご指導をいただき、深く謝意を表する次第である。

2. 試作インバータの概要

2.1 推進用インバータ

推進用インバータは、負荷である誘導かご形電動機を広範囲にわたり効率よく制御するために、パルス幅変調方式（PWM）による可変電圧-可変周波数制御（VVVF）方式としており、その主要目を表 1，ブロック図を図 1 に示す。各部品の耐圧容器の実装を図 2 に示すように、胴体部にコネクター，中央部に制御回路部品および制御電源回路部品を配し，両半球部に各々厚さ 6 mm のアルミニウム製の半球，（アルミニウムシェル）を密着させ，これに主回路部品を取り付け，発熱の冷却効果をはかっている。

推進用インバータの動作は，以下のとおりである。

コンダクタ 42 P が投入されると直流制御電源がいかされるとともに，充電抵抗 L R を通して

コンデンサーC Fが充電される。充電が完了すると72 Pが“ON”となり、L Rは短絡される。

起動指令が与えられると、起動条件を満足していることを条件に、起動停止回路から傾斜信号発生回路およびゲートロジック回路に“ON”指令が与えられる。

その後、速度指令が与えられるとその極性によって正転または逆転の判別を起動停止回路で行い、高周波変調回路へ相回転の指令を行う。速度指令は、傾斜信号発生回路で傾斜信号Sr'に変換され、パターン発生回路に与えられる。

パターン発生回路はインバータ出力の電圧および周波数パターンを発生するもので、誘導電動機の磁気飽和を避けるために電圧と周波数の比はほぼ一定となるように制御されている。

電圧パターン信号は電圧補正回路で直流主回路電圧値によって補正信号Vrに変換され、また周波数パターン信号Frは直接高周波変調回路へ与えられる。電圧補正回路は、直流主回路電圧の変動に対してインバータの出力電圧が一定になるように動作する。高周波変調回路では出力電圧のゼロから最高電圧（120°幅の矩形波モード）までを64ステップに分割し、電圧パターン信号Vrに対して所定の高周波モードを発生する。

64ステップの電圧パターンは、同期モードと非同期モードの二つの異なる動作モードを有している。同期モードでは、出力電圧の位相は常に一定となり、その波形はROMで記憶された所定の出力基本波電圧のパルス幅変調波形で、高調波含有率が最小となるように考慮している。非同期モードでの波形は、出力周波数に同期した正弦波信号と一定周波数の三角波信号との大きさを比較して得られるパルス幅変調波形で、高調波含有率が最小となるようにしている。

高周波パルス幅変調回路の出力は、ゲートロジック回路に振分けられ、続いてベース駆動回路によって主回路パワートランジスタを導通させるに十分な信号に増幅される。

パルス幅変調波形を図3に示す。この図は同期モードの波形例としてU-Y相の相電圧波形およびU-V間の線間電圧波形を示す。

図中の点線は基本波電圧成分を示し、矩形波モードの基本波電圧成分を100%とするとU



写真1 インバータ実装状態
Interior of inverter

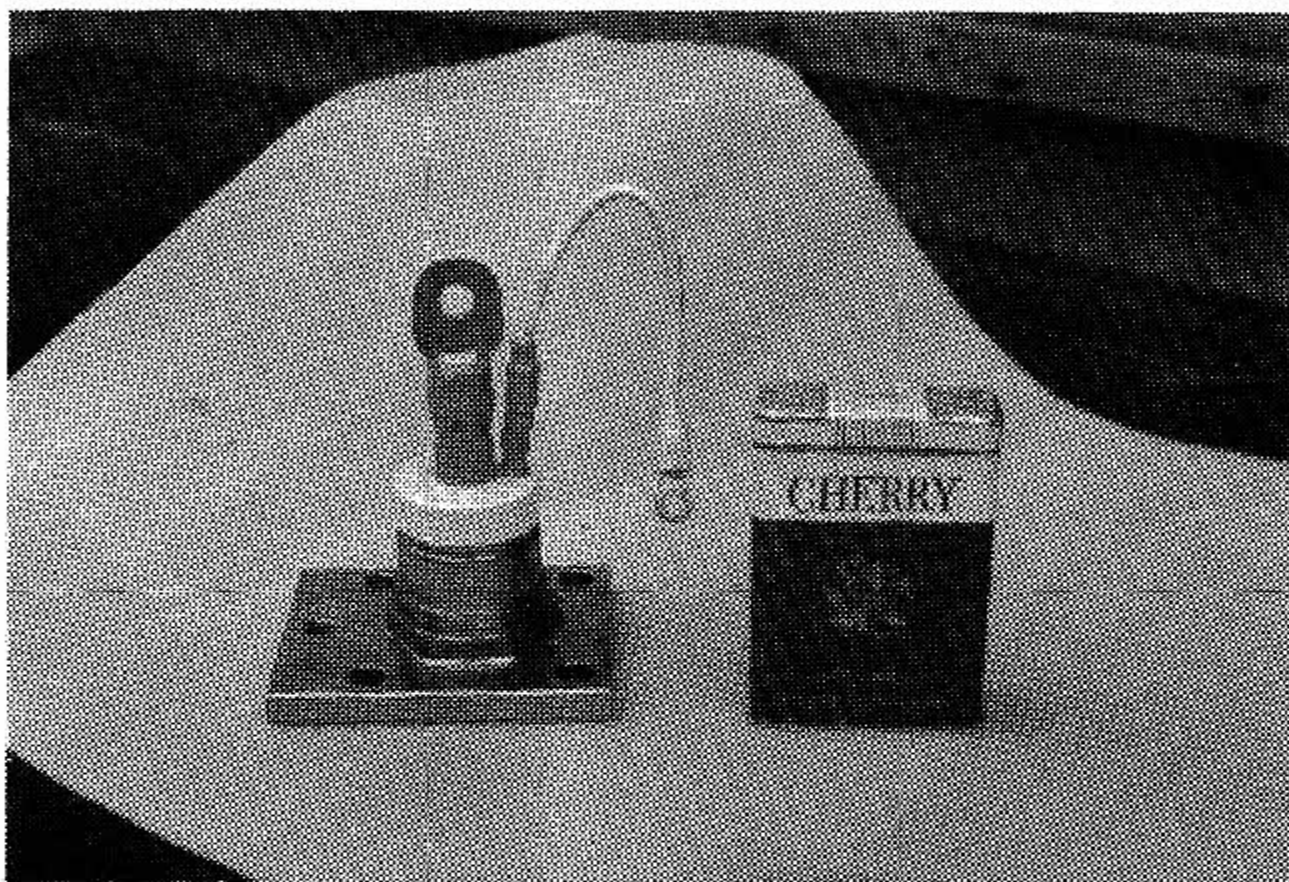
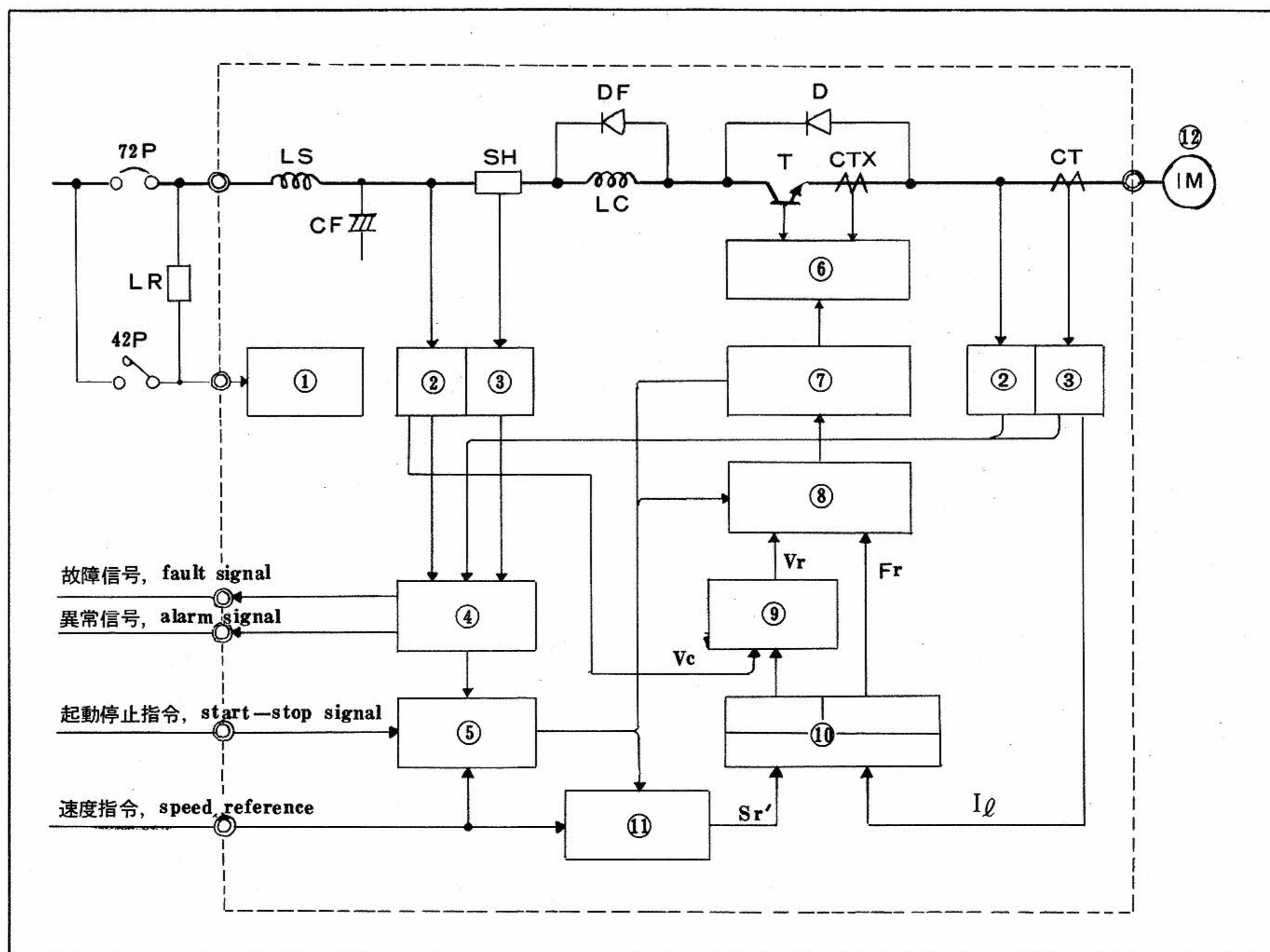


写真2 大電力トランジスタ
High power transistor

表1 試作インバータの主要目
Specifications of inverter

項 目 item	推進用インバータ inverter for propulsion		通信用インバータ inverter for general use	
	主推進用 main pro.	補助推進用 aux. pro.	交 流 用 A C	直 流 用 D C
方 式 type	パルス幅変調方式 multiple pulse width modulation		電圧型パルス幅制御方式 single pulse width modulation	
制 御 contor	可変電圧-可変周波数制御方式 V V V F		定電圧-定周波数制御方式 C V C F	
入力電圧 input voltage	D C 95 V ~ 135 V		D C 95 V ~ 135 V	
出 力 out put	A C 3 ϕ 7.5kVA	A C 3 ϕ 6.4kVA	A C 1 ϕ 2.2 kVA	D C 2.3 kw
出力電圧 out put voltage	0 ~ 85 V	0 ~ 85 V	115 V	28 V
出力周波数 out put frequency	10 ~ 120 Hz	10 ~ 120 Hz	60 Hz	D C (480Hz)
定 格 rating	100% cons. 150% 10 min.	100% cons.	100% cons.	100% cons.
負 荷 load	4 kw cage type induction motor × 1	1.5kw cage type induction motor × 2	navigations and communications equipment etc.	



- | | |
|---------------------|--------------------------------------|
| 1. 直流制御電源回路, | DC control power source |
| 2. 電圧センサ, | voltage sensor |
| 3. 電流センサ, | current sensor |
| 4. 故障検出回路, | fault detector |
| 5. 起動停止回路, | start-stop circuit |
| 6. ベース駆動回路, | base drive circuit |
| 7. ゲートロジック回路, | gate logic circuit |
| 8. パルス幅変調回路, | PWM logic circuit |
| 9. 電圧補正回路, | volt compensator |
| 10. 電圧および周波数パターン回路, | pattern generator (volt & frequency) |
| 11. 傾斜信号発生回路, | ramp function generator |
| 12. 誘導電動機, | induction motor |

図1 推進用インバータブロック図 (主推進用)

Block diagram of inverter for propulsion

—V間のそれは93.8%となる。線間電圧の半サイクル期間中のパルス数は、図中では5パルスとなっているが、基本波電圧を減少させるときには、パルス数は増加し、各パルス幅は狭くなる。

主回路パワートランジスタのベース駆動方式は、エミッタ電流を変流器CTXでベースへ帰還するもので、変流器の変流比Nはトランジスタの電流増幅率 h_{fe} に合わせている。すなわち、エミッタ電流 I_e に対して、ベース電流 I_B は、

$$I_B = I_e / N = I_e / h_{fe} \dots\dots\dots (1)$$

となり、最適なベース電流を常に流すように設

計している。

2.2 通信用インバータ

通信用インバータは、負荷が通信、航海等の一般電気機器であるため、パルス幅制御方式による定電圧一定周波数制御(CVCF)方式のインバータとし、また負荷端の電圧が常に一定となるように制御するため、直流主回路電圧の変動に対してインバータの通流幅を自動的に制御する位相制御方式を採用している。

本インバータの主要目を表1、ブロック図を図4に示す。

各部品の耐圧容器への実装方法は、図5に示すように、基本的には推進用インバータと同じ

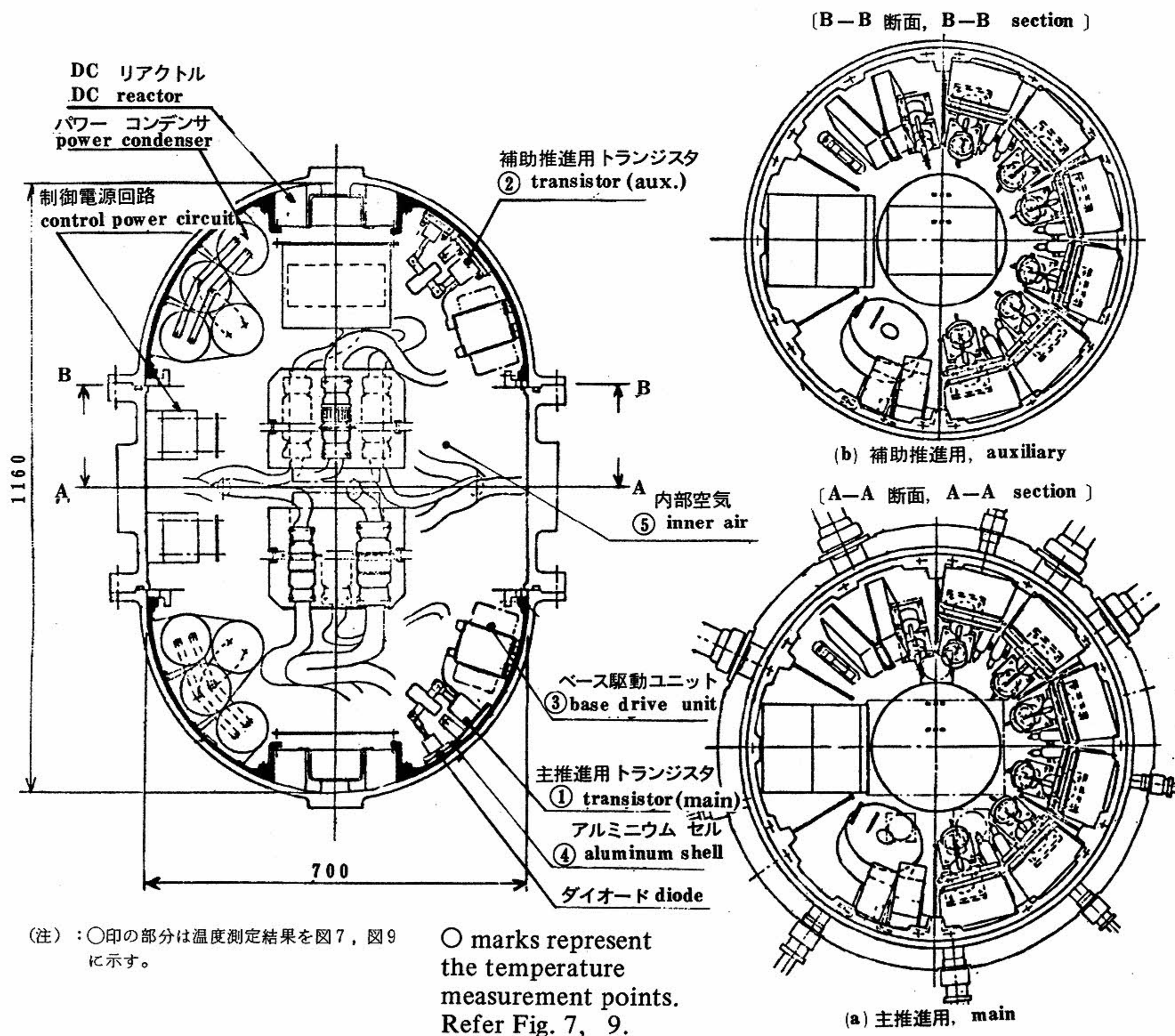


図2 推進用インバータ組立図
Inverter for propulsion

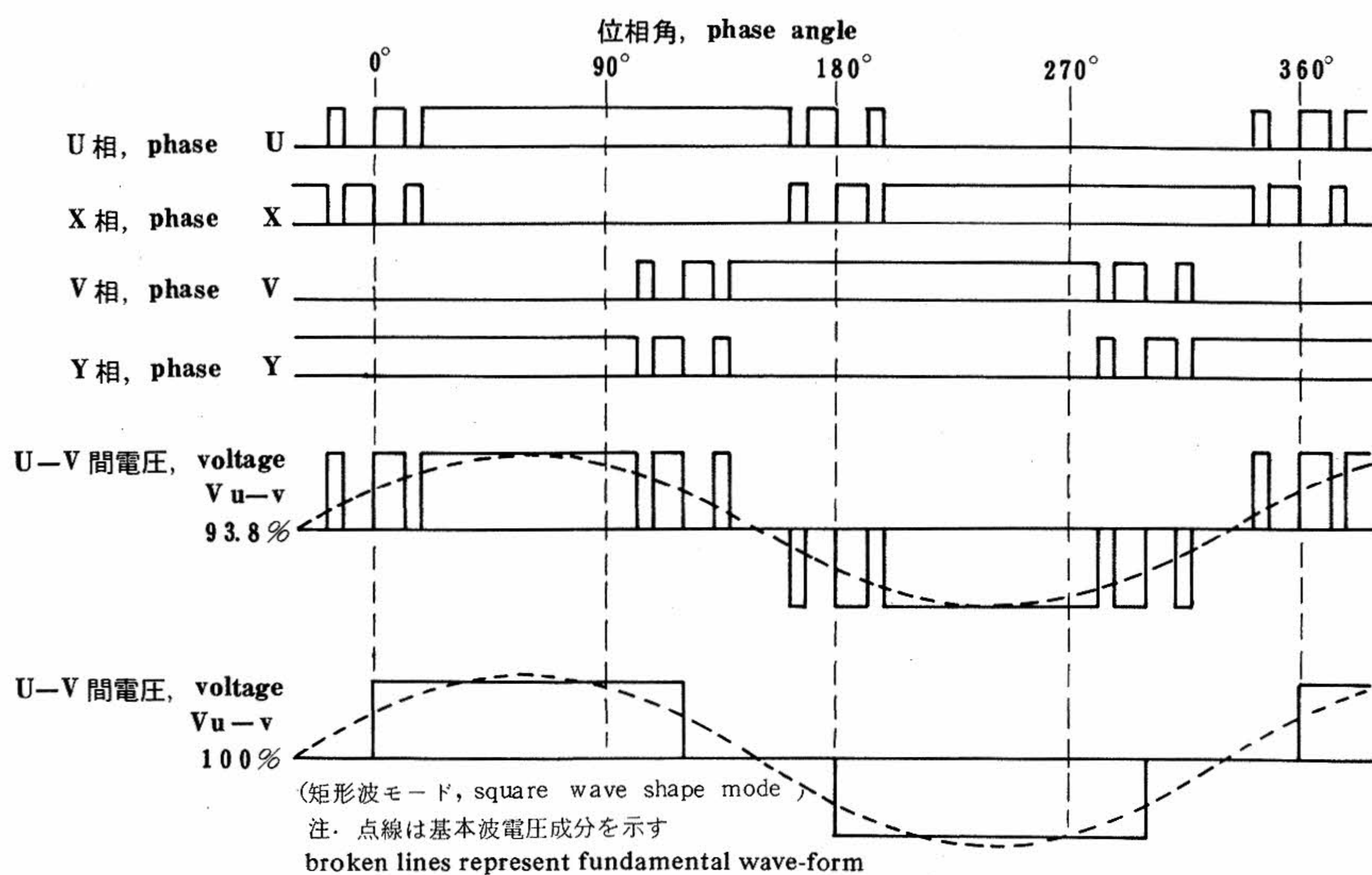
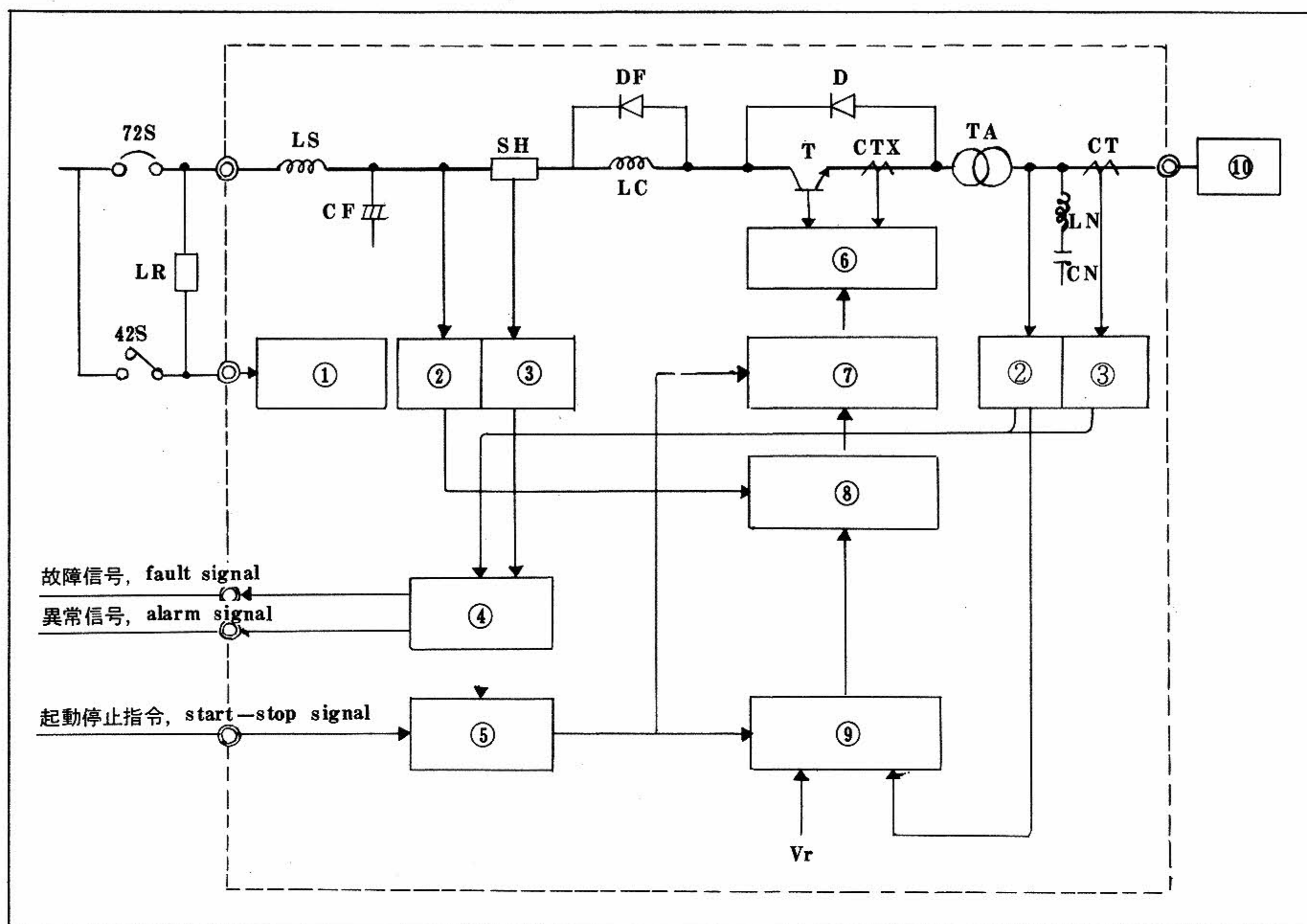


図3 推進インバータのパルス幅変調波形
Wave-forms of multiple PWM inverter for propulsion

表2 推進用インバータ負荷特性
Out-put characteristic (inverter for propulsion)
(入力電圧, in-put volt : 108V)

character- istic 区分 class	出力 out-put (kw)	周波数 frequency (Hz)	電圧 voltage (V)	電流 current (A)	負荷力率 power factor (%)	入力 in-put (kw)	効率 efficiency (%)
主推進用 main	0.28	25	43.0	13.0	59.2	0.67	41.8
	0.96	50	58.5	21.8	68.7	1.41	68.1
	5.50	105	85.0	49.2	83.0	6.00	91.7
	8.76	120	82.0	73.0	92.4	9.56	91.6
補助推進用 aux	1.18	60	67.0	21.0	67.5	1.54	76.6
	5.20	120	83.8	43.0	90.7	5.73	90.8



- | | |
|---------------|-------------------------|
| 1. 直流制御電源回路, | DC control power source |
| 2. 電圧センサ, | voltage sensor |
| 3. 電流センサ, | current sensor |
| 4. 故障検出回路, | fault detector |
| 5. 起動停止回路, | start-stop circuit |
| 6. ベース駆動回路, | base drive circuit |
| 7. ゲートロジック回路, | gate logic circuit |
| 8. 位相制御回路, | phase control circuit |
| 9. 電圧コントローラ, | voltage controller |
| 10. 負荷, | load |

図4 通信用インバータブロック図 (交流用)
Block diagram of inverter for general use

であるが、出力トランスが大きなスペースを占めている。

通信用インバータの動作は以下のとおりである。

コンタクタ42Sが投入されると、直流制御電源が生かされるとともに、充電抵抗LRを通してコンデンサCFが充電される。コンデンサCFの充電が完了すると72SがONとなり、LRは短絡される。

起動指令が与えられると、起動条件を満足していることを条件に、起動停止回路から電圧コントローラおよびゲートロジック回路にON指令が与えられる。

インバータの出力電圧を電圧センサーで検出して得られる電圧フィードバック信号と電圧基準信号 V_r との偏差が電圧コントローラで増幅され、位相制御回路に位相信号として与えられる。

位相制御回路は発振器を内蔵しており、この発振器によって出力電圧の周波数が決定される。発振周波数は、交流115V用は60Hz、また直流28V用は480Hzに設定されている。上記位相信号とこの発振周波数に同期した三角波信号との大きさの比較から位相遅れ角 α を得る。

インバータは単相全波ブリッジ回路によって構成されており、UおよびX相を固定相、またVおよびY相を可変位相にし、UおよびX相の位相を基準にして、VおよびY相の位相を調整する。

パルス幅制御波形を図6に示す。

この図の実線で示される三角波信号と一点鎖線との交点の位相角が位相遅れ角 α を示す。インバータ出力のU-V間の線間電圧波形はパルス幅 α の矩形波電圧である。

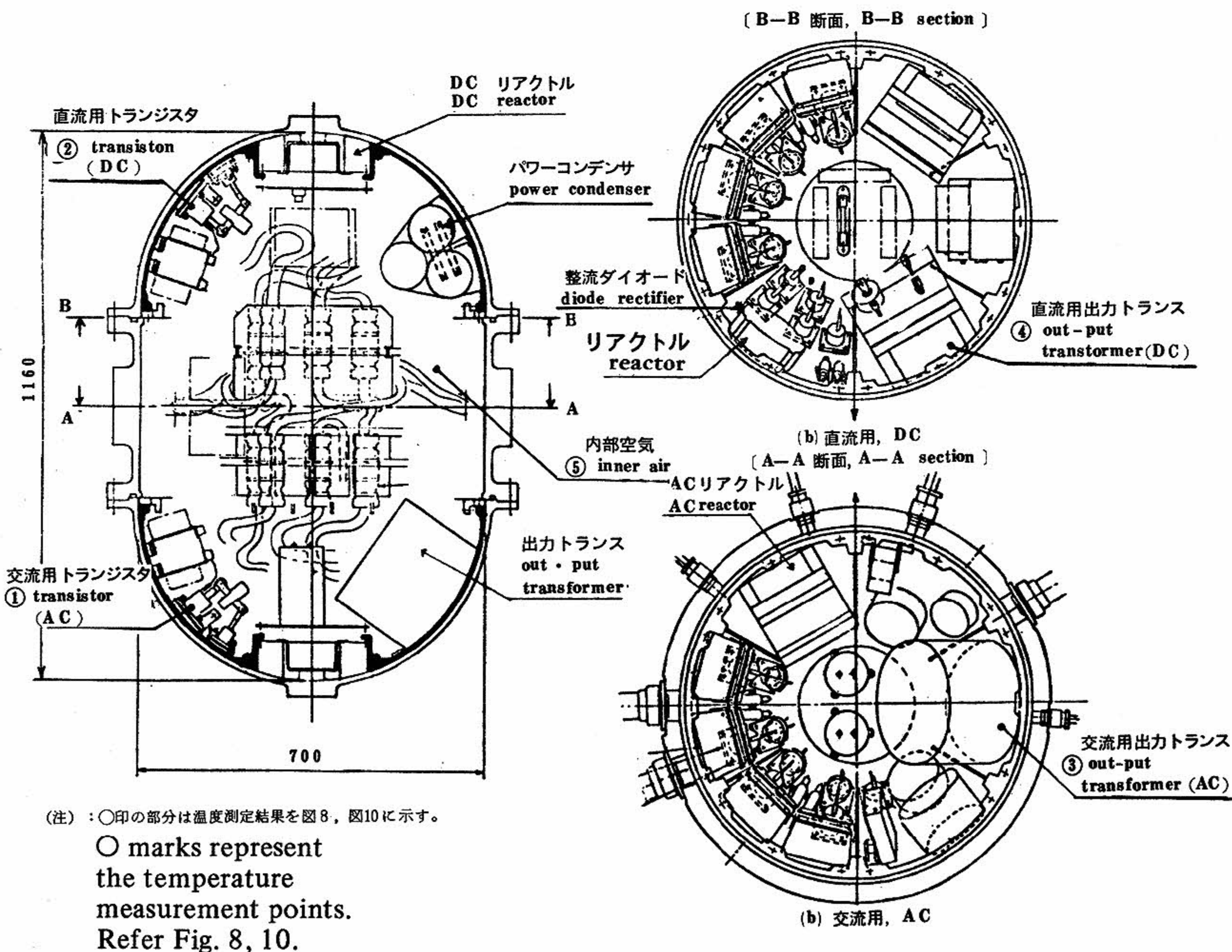


図5 通信用インバータ組立図
Inverter for general use

交流用インバータは、出力トランスを経てフィルター回路で正弦波出力電圧 V_L を得ている。直流用インバータは、出力トランスおよび整流ダイオードを経てLC平滑回路により直流出力電圧 V_D を得ている。

出力電圧の関係式は次のようになる。

$$V_L = 0.9 \times E_p \times n_1 \times \sin \frac{\alpha}{2} \quad (\text{交流}) \cdots (2)$$

$$V_D = E_p \times n_2 \times \alpha / 180^\circ \quad (\text{直流}) \cdots (3)$$

ただし、 E_p = 直流主回路電圧、

n_1 = 交流出力トランスの巻線比、

n_2 = 直流出力トランスの巻線比

主回路パワートランジスタのベース駆動方式は、推進用インバータと同様に、変流器帰還方式である。

表3 通信用インバータ負荷特性

Out-put characteristic (inverter for general use)

(入力電圧, in-put volt : 108 V)

特性 区分	出力 out-put (W)	周波数 frequency (Hz)	電圧 voltage (V)	電流 current (A)	負荷力率 power factor (%)	入力 in-put (W)	効率 efficiency (%)
AC	0	60	116	0	—	454	—
	1120	60	115.3	10.3	94.3	1642	68.2
	1900	60	115	19.7	93.8	2430	78.2
DC	0	—	28.55	0	—	227	—
	1140	—	27.8	41.0	—	1555	73.3
	2254	—	27.55	81.8	—	2970	75.9

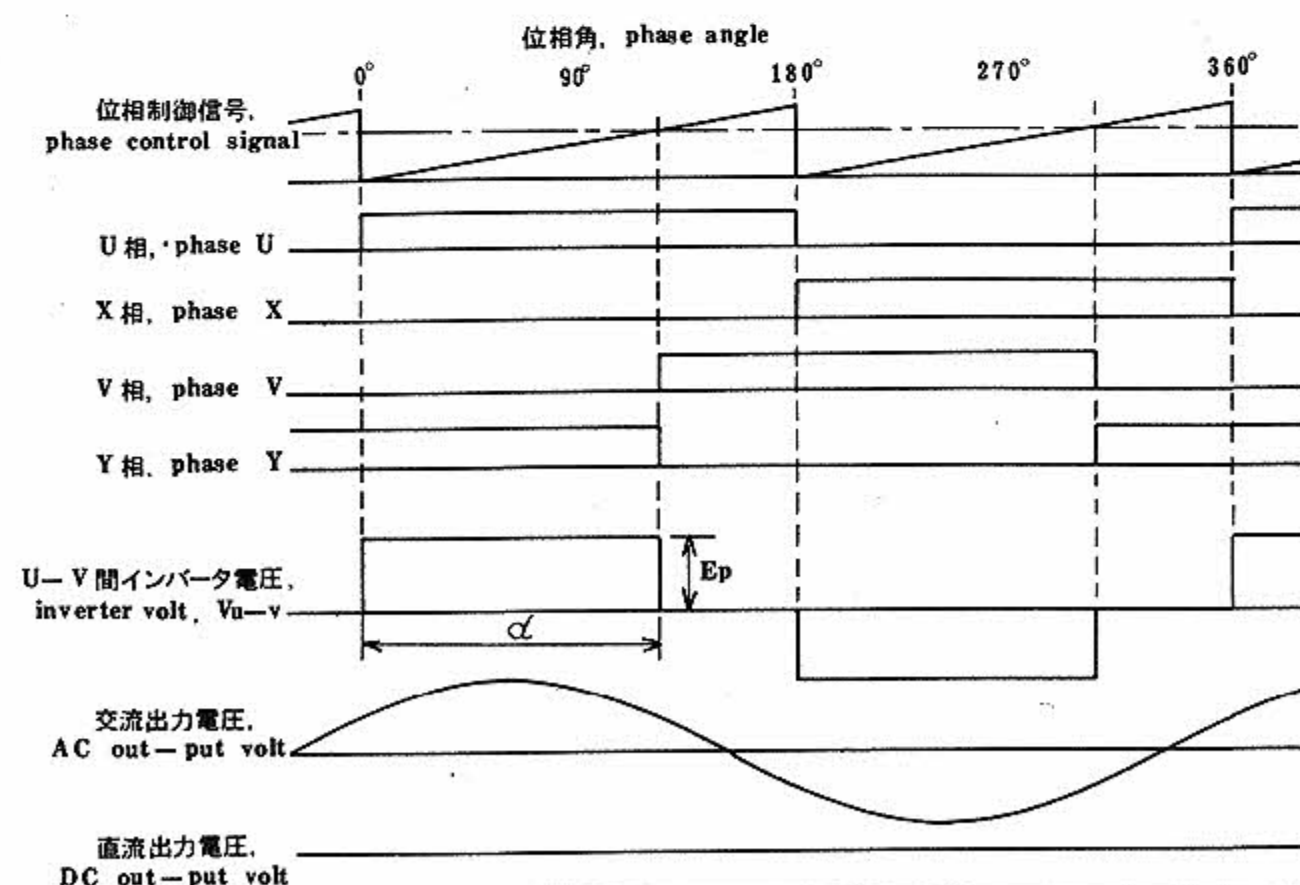


図6 通信用インバータのパルス幅制御波形
Wave-forms of single PWM inverter for general use

3. 試験方法および試験結果

3.1 負荷特性試験

本試験は、各試作インバータを小形水槽に浸し、直流入力電源として直流発電機出力を用い、また負荷として抵抗およびインダクタンスを用いて行った。試験結果を表2および表3、その出力波形を写真3および写真4に示す。

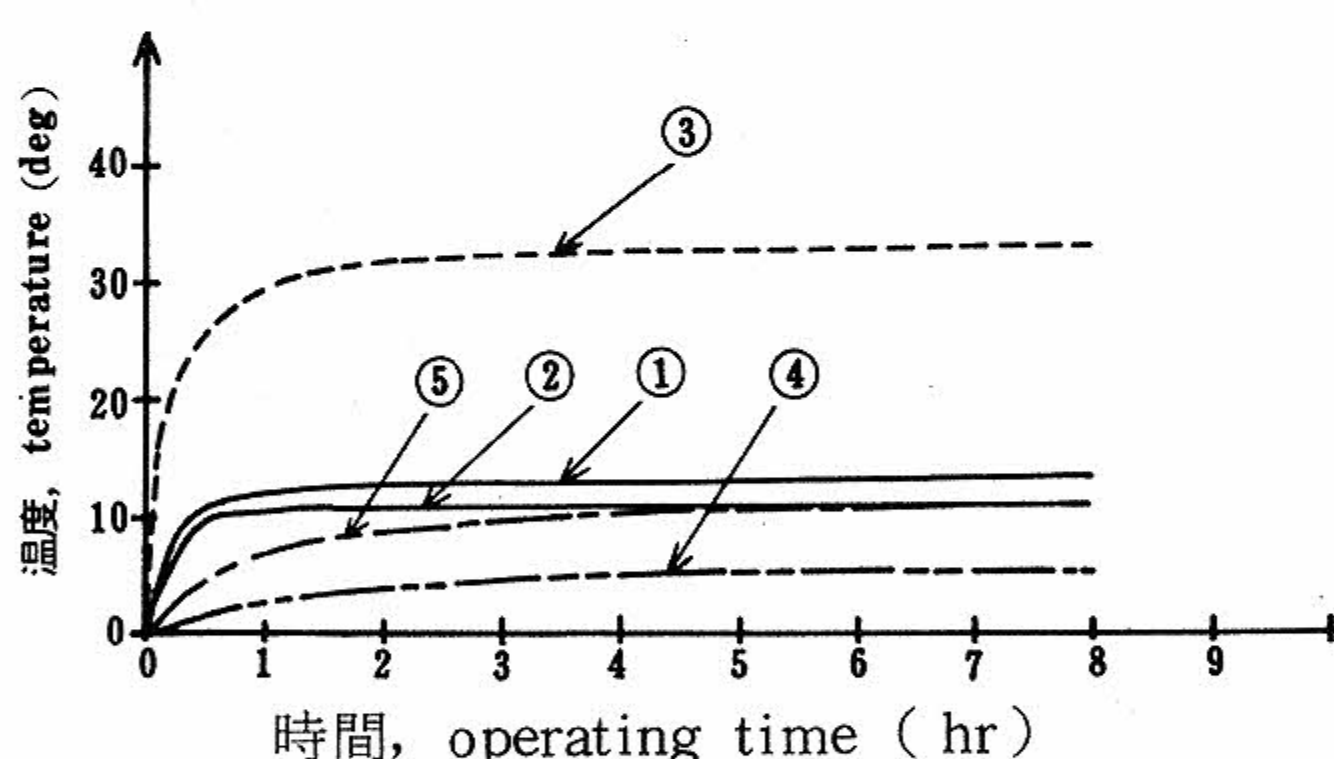
3.2 負荷瞬時変動試験

本試験は使用上の特性を考慮して、通信用インバータについてのみ実施し、次の負荷の急変時における出力電圧の変動幅および回復時間を計測した。

(負荷の瞬時変動)

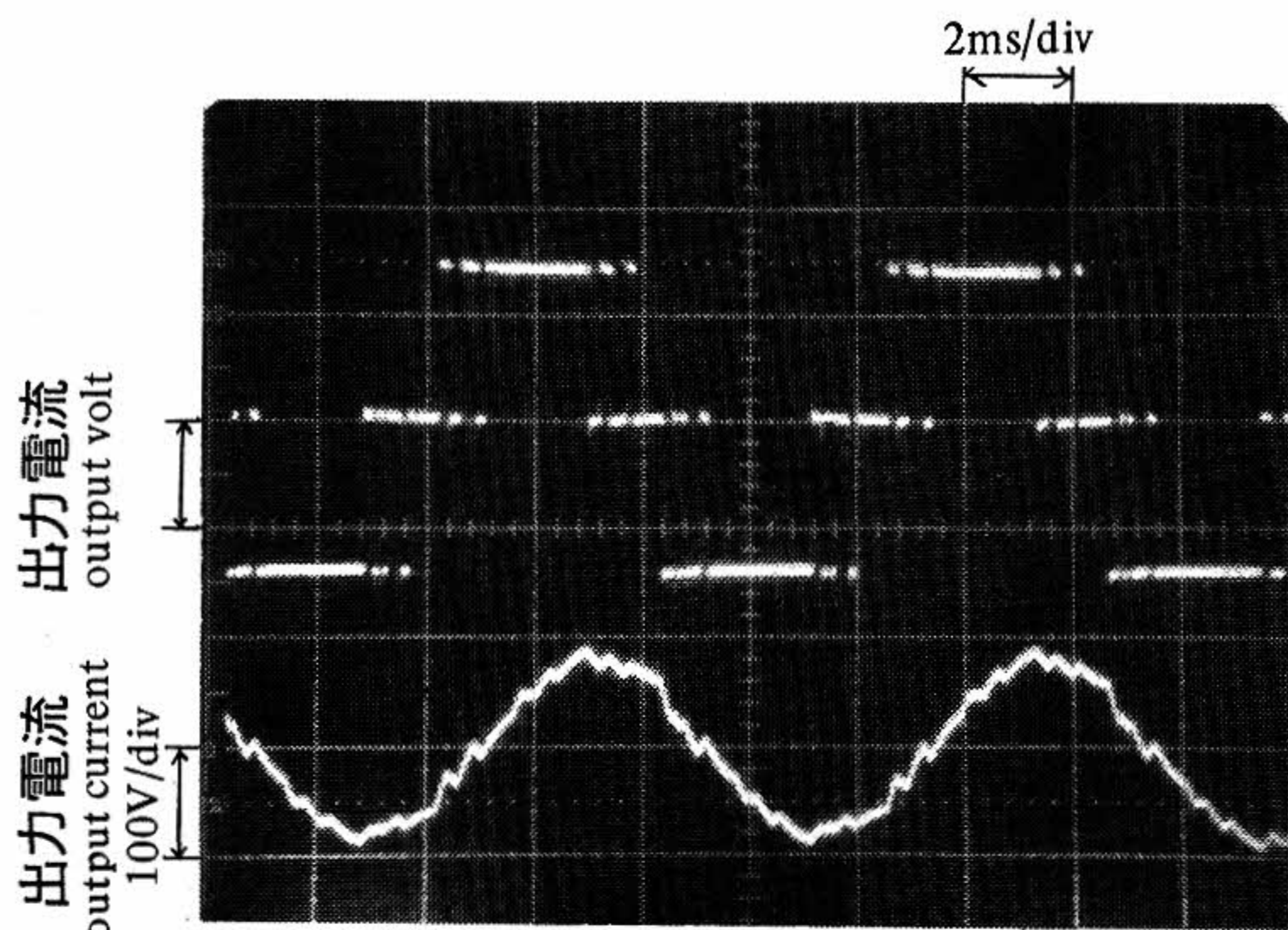
10% → 40% → 70% → 100% → 70% → 40% → 10%

計測結果は交流出力で電圧変動幅 ±10% 以下、

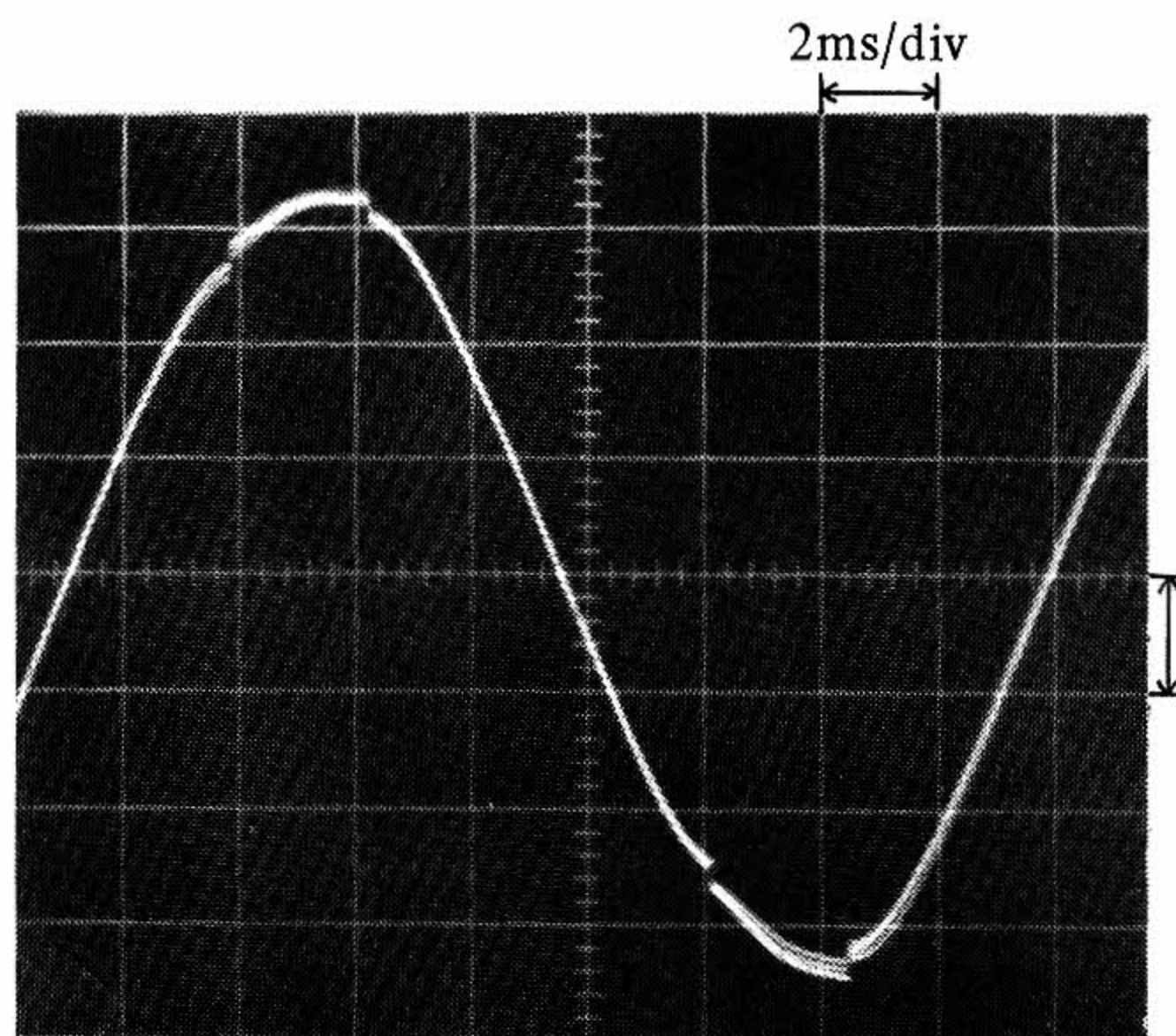


1. 主推進用トランジスタ
transistor (main)
2. 補助推進用トランジスタ
transistor (auxiliary)
3. ベース駆動ユニット
base drive unit
4. アルミニウムシェル
aluminium shell
5. 内部空気
inner air

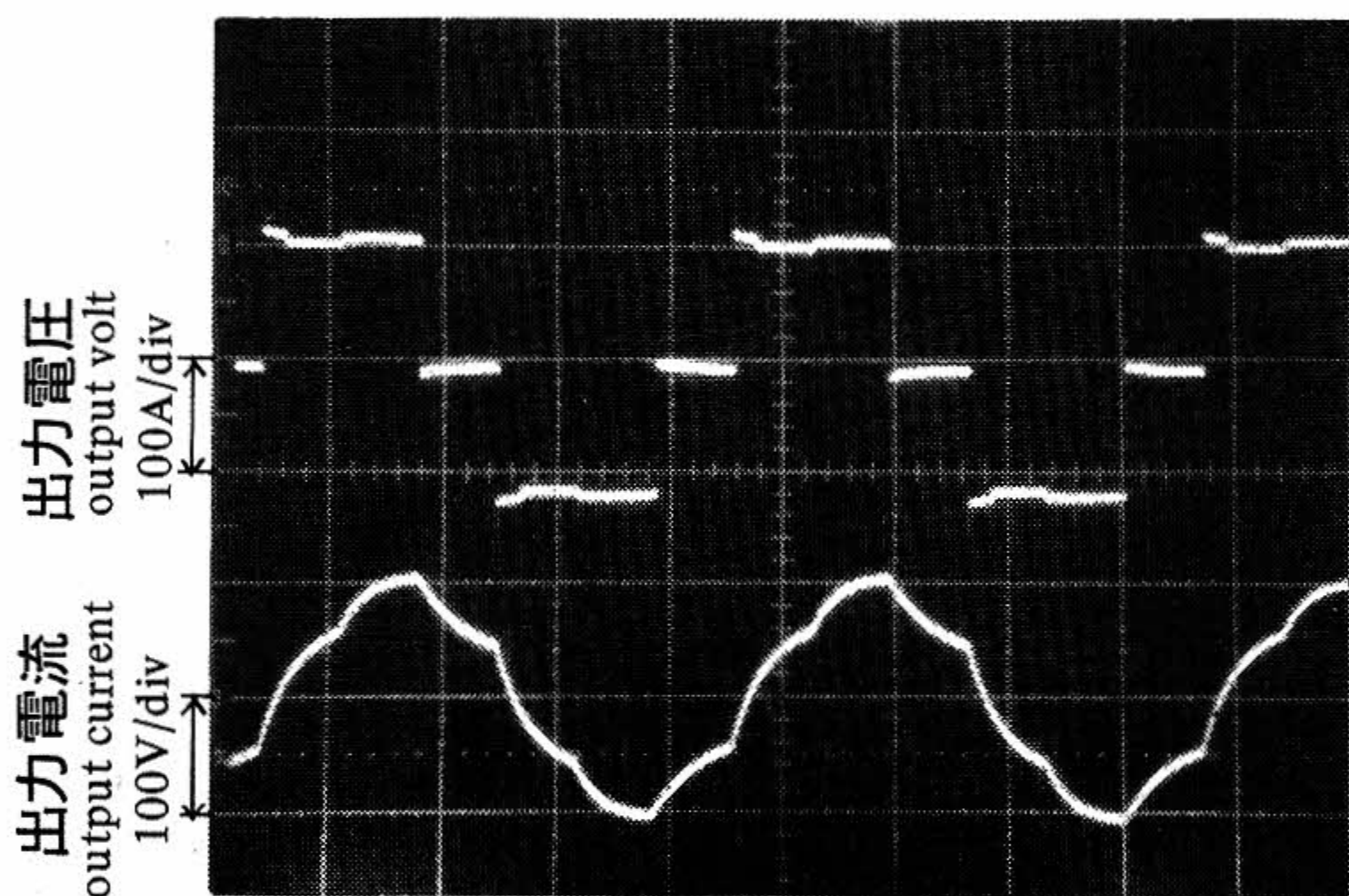
図7 推進用インバータ水中温度上昇
Temperature rise in water (propulsion)



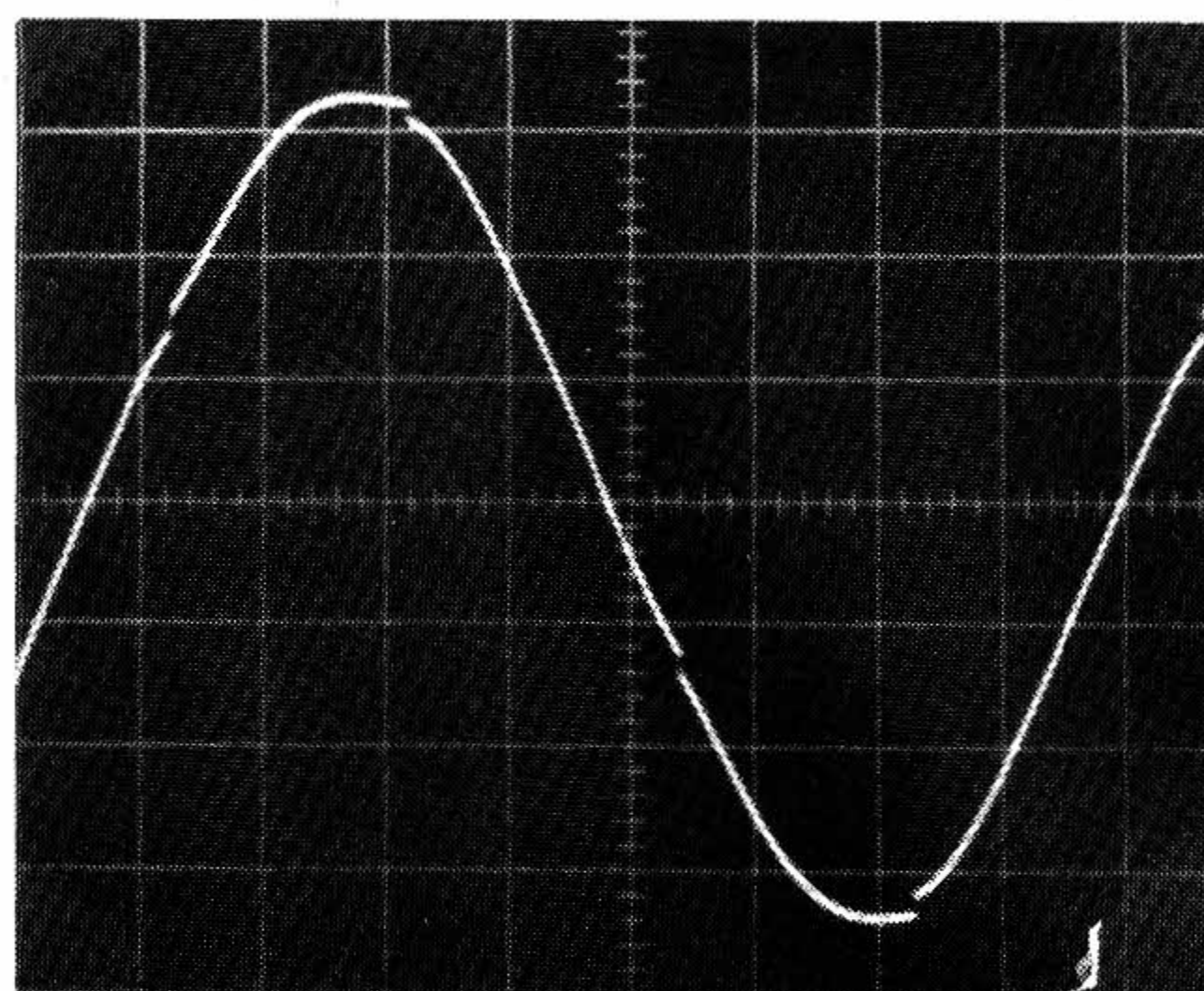
(1) 入力電圧 135V, input volt 135



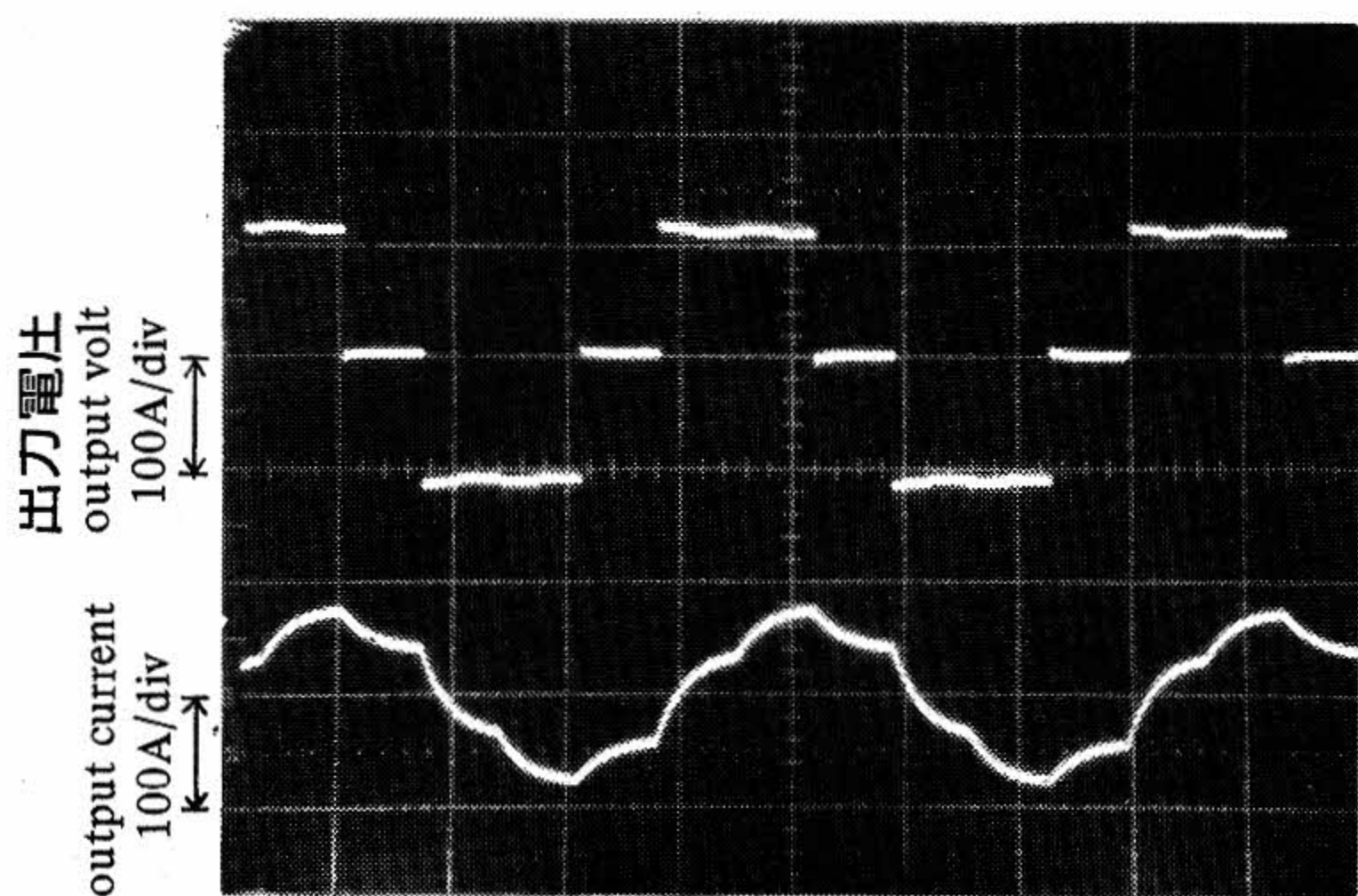
(1) 無負荷時 no load



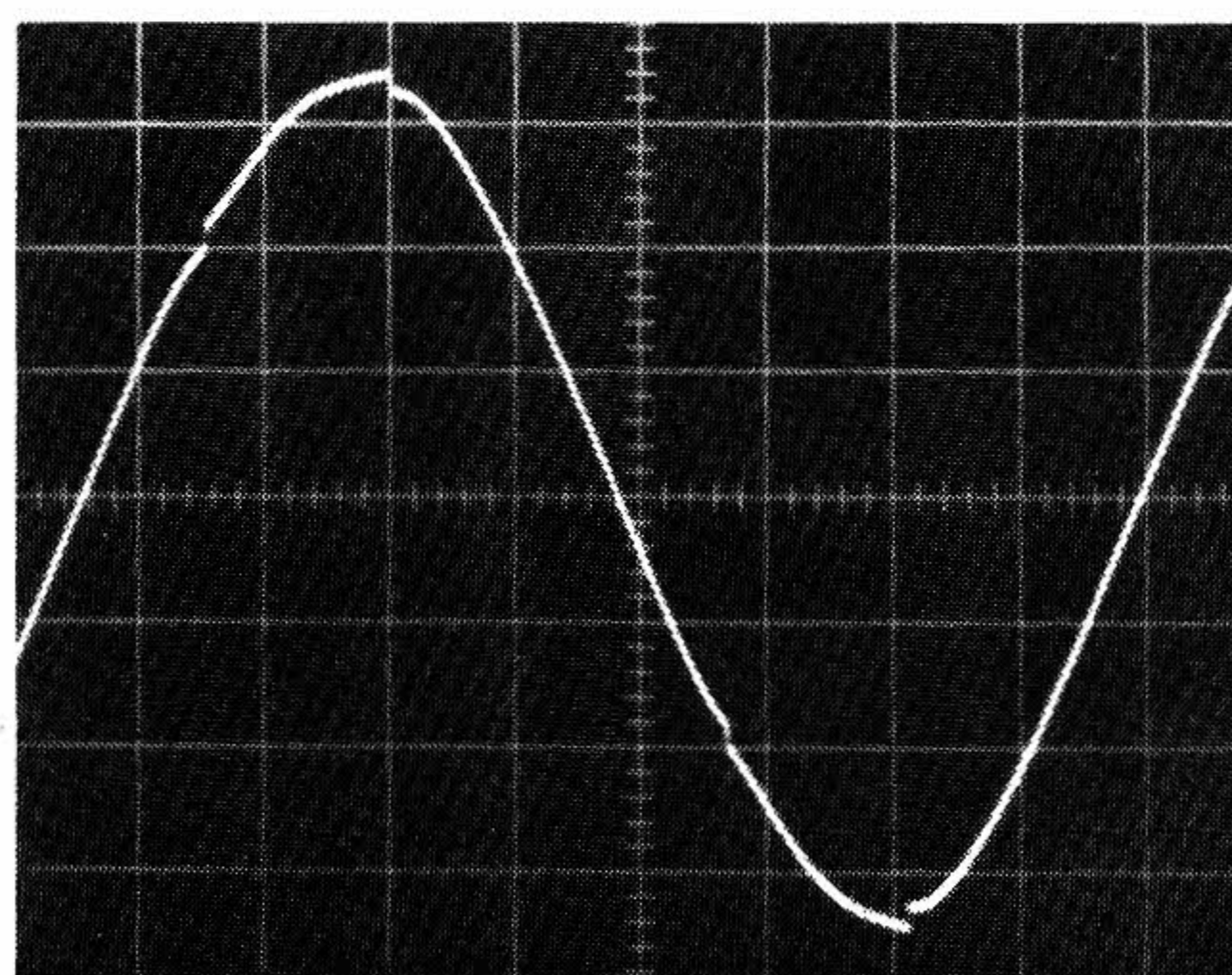
(2) 入力電圧 108V, input volt 108V



(2) 50%負荷時 50% load



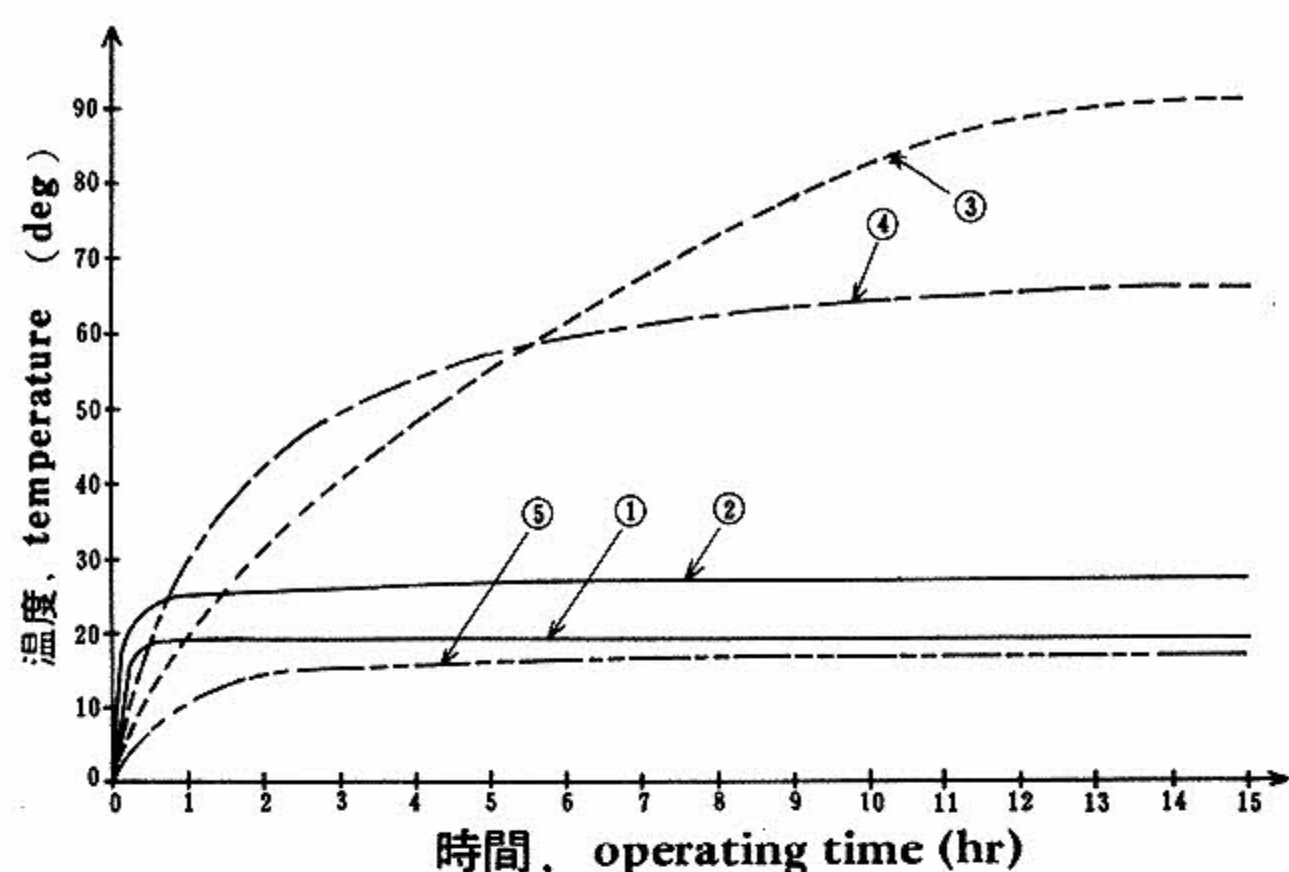
(3) 入力電圧 95V, input volt 95V



(3) 100%負荷時 100% load

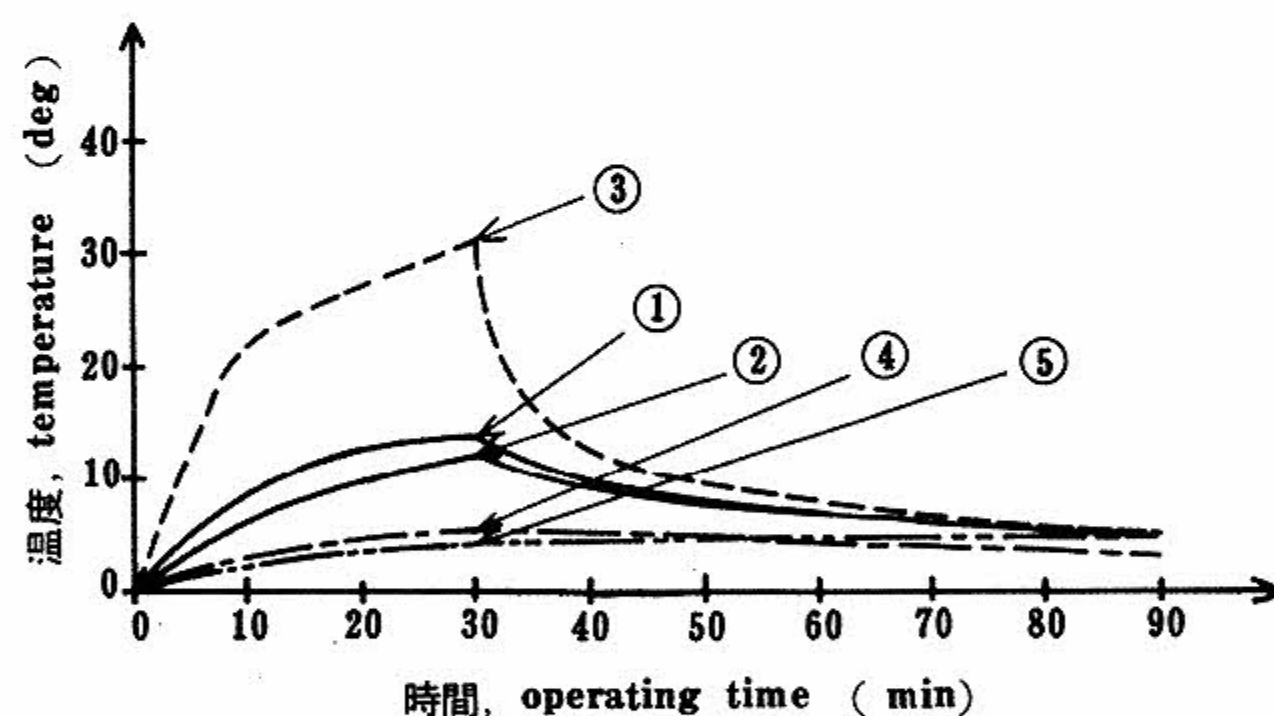
写真3 推進用インバータ出力波形
Output wave-forms of inverter for propulsion

写真4 通信用インバータ交流出力電圧波形
AC output wave-forms of inverter for general use



1. 交流用トランジスタ, transistor (AC)
2. 直流用トランジスタ, transistor (DC)
3. 交流用出力トランス, out-put transformer (AC)
4. 直流用出力トランス, out-put transformer (DC)
5. 内部空気, inner air

図8 通信用インバータ水中温度上昇
Temperature rise in water
(inverter for general use)



1. 主推進用トランジスタ, transistor (main)
2. 補助推進用トランジスタ, transistor (auxiliary)
3. ベース駆動ユニット, base drive unit
4. アルミニウムシェル, aluminum shell
5. 内部空気, inner air

図9 推進用インバータ気中温度上昇 (30%負荷)
Temperature rise in air at 30% load
(inverter for propulsion)

回復時間4サイクル以内であり、直流出力では電圧変動幅 $\pm 11\%$ 以下、回復時間は0.1s以内であった。

3.3 水中温度上昇試験

本試験は常温常圧水中（小形水槽内）で各インバータを100%負荷状態とし、各部の温度が平衡状態に達するまで、8時間以上連続運転し、各部の温度上昇を測定した。その測定結果を図7および図8に示す。

3.4 気中温度上昇試験

本試験は実船における大気中の単時間の運転を考慮した試験であり、耐圧容器を密閉状態のまま大気中で30min運転し、各部の温度上昇を測定するとともに、大気中での冷却状態を観察した。

負荷条件について実際の状況を考慮し、推進用インバータは主および補助推進用電動機の無負荷運転に相当する負荷をかけ、また通信用インバータは交流用および直流用共に30%の負荷状態とした。

その測定結果を図9および図10に示す。

3.5 相互干渉試験

本試験は各試作インバータについて、同一容器内の2組のインバータを同時に定格状態で運転しておき、一方のインバータの負荷を急変（100%→50%→0%→50%→100%）させたときの他方のインバータの出力波形を観測し、異常の有無を調査した。

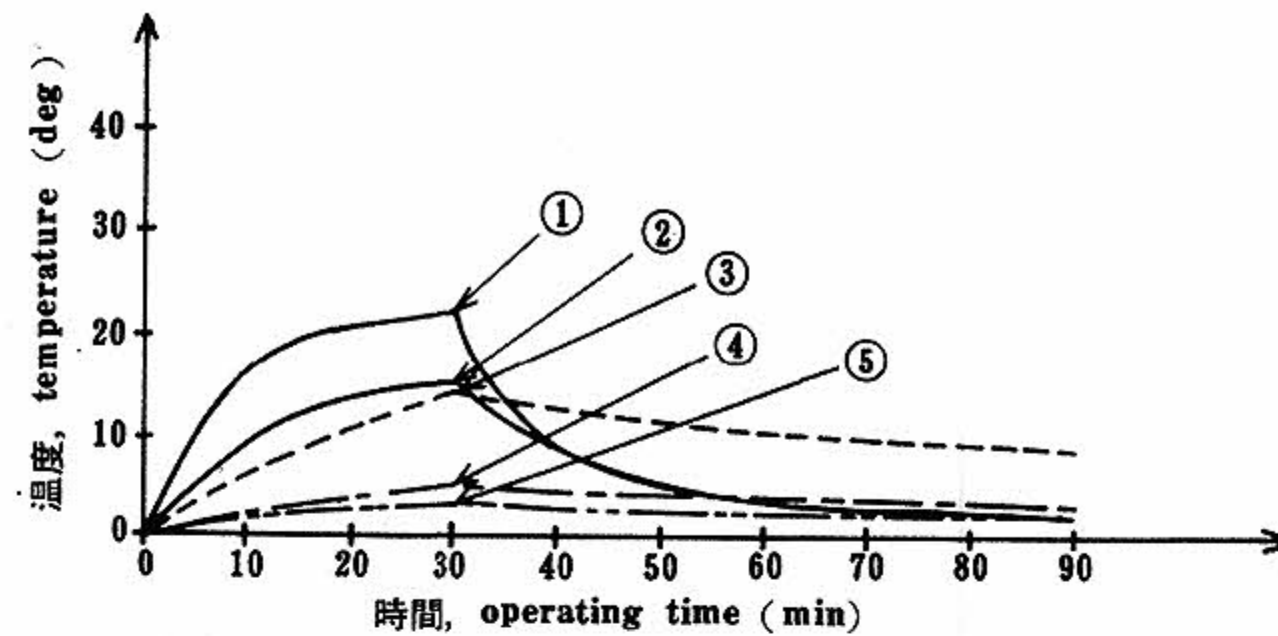
測定結果は良好で、全く異常が認められなかった。

3.6 振動試験

推進用インバータおよび通信用インバータは、使用部品の選定および実装方法が基本的に同じであるので、本試験は通信用インバータについて行った。

まず、振動試験機を用い、0.1Gの一定加速度で周波数5～60Hzの間を掃引し、有害な共振点のないことを確認した。次に周波数を30Hzとして0.7Gの加速度で2hr、さらに2Gの加速度で30s加振したのち、耐圧容器を開放し、内部の破損、ねじのゆるみ等を調査した。その後、耐圧容器を密閉し、インバータを運転して異常の有無を調査した。

試験の結果、全く異常を認めなかった。



1. 交流用トランジスタ, transistor (AC)
2. 直流用トランジスタ, transistor (DC)
3. 交流用出力トランス, out-put transformer (AC)
4. 直流用出力トランス, out-put transformer (DC)
5. 内部空気, inner air

図10 通信用インバータ気中温度上昇(30%負荷)

Temperature rise in air at 30% load (inverter for general use)

4. 考察

4.1 効率

トランジスタはベース電流を遮断することによってターンオフすることができるが、サイリスタでは外部から電流を強制的にゼロにするため、逆電圧を印加する必要がある。

サイリスタに逆方向の振動電流を流すためには、転流用サイリスタ、リアクトル、コンデンサ等の装置が必要となり、この転流装置の損失は素子のスイッチング損失、導通期間中の損失に比べて非常に大きい。

試作したインバータと同程度の容量(10 kVA程度)のサイリスタインバータの効率が70~80%であるのに比べ、今回のトランジスタインバータでは推進用インバータ(7.5 kVAおよび6.4 kVA)で90%以上が得られた。

通信用インバータは容量が2.2 kVAおよび2.3 kWと容量が小さいうえ、良好な波形を得るためのトランスやフィルター回路の損失にかかわらず、80%近くの効率が得られている。

これらの高効率が達成できたのは、小容量トランジスタの並列接続方式によらず、大電力トランジスタを採用したことにも、一因が考えられる。

4.2 温度上昇

水中温度上昇試験において、推進用インバータでは温度上昇の最も大きいベース駆動ユニットで33deg程度あり、海水温度が30℃と高く見積っても、本回路の許容温度75℃で余裕がある。

また通信用インバータでは交流用出力トランスの温度上昇が大きく、91degであり、この種のトランスの許容温度150℃に比して十分小さい。

このように、各部品の温度上昇はそれぞれの許容温度よりも低く、潜水船に装備して使用することが可能であることが確認された。

気中温度上昇試験でも、同様に良好な結果が得られ、陸上、または支援母船上での試験運転並びに準備運転が可能である。

ただし、試作機の容器は実験の都合上、铸铁製容器を用いたが、実機ではチタン合金製の容器を用いる。この場合は、次のように問題が解決される。

4.2.1 平衡状態

温度が平衡状態に達した場合には、铸铁とチタン合金との熱伝導率の比率から温度変化が推定できる。

今回の試験結果から铸铁部の温度勾配は1 deg以下であり、余裕をみて1 degとすれば、熱伝導率の比率からチタン合金の場合の温度勾配は7.5 degとなる。したがって容器内の各発熱体は6.5 degだけさらに上昇することになるが、各部品共に許容値以下に納まる。

4.2.2 過渡状態

温度が平衡状態に達する前の過渡状態においては、熱伝導率のみでなく、熱時定数を考慮する必要がある。

チタン合金と铸铁との熱時定数の比率から過渡状態におけるチタン合金製容器の温度勾配を

計算すると 1.2 deg である。したがって鋳鉄製容器との温度変化分は 0.2 deg の上昇であり、ほとんど変化がない。

4.3 実装方法

振動試験および温度試験の結果、今回採用したアルミニウムシェルを用いた実装方法は、耐圧容器に特別な加工を必要とせずに電気部品を実装でき、また冷却効果も十分であることが確認できた。

さらに制御回路に IC メモリーを使用する等、回路および部品を吟味することによってプリント基板の実装密度を高めるとともに、制御用電源の消費を少なくすることができたので、実機では耐圧容器の胴体部の長さを若干 (60mm 程度) 短くし、さらに小形軽量化ができる見通しが得られた。

5. あ と が き

潜水船に装備することを目的とし、推進用インバータおよび通信用インバータの試作試験を行っ

た結果、潜水船用電源システムの一つとして使用できることが明らかとなり、所期の目的を達成した。

実機製作にあたっては、今回の試作試験の成果を十二分に活用すれば、信頼性の高いインバータの製作が期待できる。

なお、本試作機を使用して水中雑音の減少について検討を加えたが、これについては別稿に譲ることとする。

文 献

- (1) 赤松昌彦, 内田良平, 1977, “電気自動車用 CT 帰還トランジスタチョッパ装置”, 電気学会研究会, EPA-77-1
- (2) 重信正広, 朝枝健明, 1979, “パルス幅変調方式トランジスタインバータ”, 電気学会研究会, PCC-79-9
- (3) 吉田太郎, 新良由幸, 1976, “誘導電動機の可変速制御”, 電気学会誌 96(5)