

20. ダイバー加温システムの運用実験

山田 稔*¹ 門元 之郎*¹ 稲垣 夏郎*¹ 神田 修治*¹ 村井 徹*¹

深海潜水における低温環境は、熱伝導率の高いヘリウムガスの使用と潜水服の高圧下での収縮による断熱効果の低下などとあいまって、ダイバーの体熱損失の増大をきたす。この対策として、ダイバー加温システムは不可欠である。本研究は、ダイバー加温システムとして、温水加温服、温水式 PTC ヒーターおよび PTC 保温材について、総合的な実用実験を行ったものである。温水式加温服システムを潜水シミュレーターに組み込み、水深 300 m 水温 5℃ までの深々度、低温下で実験を行なうとともに、シートピア装置の PTC に、温水式ヒーターおよび耐圧保温材を取りつけ、温水加温服システムと組合わせて水深 60 m での冬期実海域実験を行い、性能および作動を確認し、効果が顕著であることを知るとともに、温水供給のためのホースの圧力損失および熱損失に関する資料、温水式 PTC ヒーターの熱出力についての資料、PTC 保温材の断熱効果として熱通過率の資料等を得た。

Operational Study on the Diver Heating System

Minoru Yamada*¹, Yukio Kadomoto*¹,
Natsuo Inagaki*¹, Shuji Kanda*¹, Tohru Murai*¹

The diver heating system is essential in deep-sea diving. It must compensate for heat-loss of the divers due to the low temperature of sea water, high heat conductivity of the helium-mixed environmental gas, and reduction of the heat insulating capability of the diving suit under high water pressure.

This paper reports on the operational study on the diver heating system including the hot water diver suit system, hot water PTC heater, and watertight heat insulation on the PTC.

The hot water diver suit system is combined with the diving simulation facility, and the simulated experiments were conducted at a depth to 300 m and a temperature up to 5°C.

The hot water PTC heater and watertight heat insulation systems are assembled on the PTC of the "SEA TOPIA" diving system, and the operational experiments were conducted with the hot water diver suit system at sea (depth to 60 m) in the winter season.

The principal findings of these experiments are as follows;

- (1) The hot water suit system showed rapid effect and uniform distribution of temperature inside the suit.

Data on pressure loss and heat loss of the hot water supply hose were

*¹ 潜水技術部

*¹ Manned Undersea Science and Technology Department

obtained.

- (2) The hot water PTC heater's performance was good; and data on heat output of the PTC were obtained.
- (3) The heat insulation material of the plastic moulded glass microbaroon showed good watertightness under pressure.

For heat insulation capability, heat transfer coefficient data under operating conditions were obtained.

1. はじめに

人間が直接周囲の水圧に曝される直接潜水 (Ambient Pressuer Diving) では、深度の増加に伴い、圧力、低水温、狭視界と暗黒、潮流などの過酷な環境から、困難と危険をとまなう。

なかでも低水温はダイバーの体熱損失を増大し、寒さによる感覚麻痺、思考力の減退、作業能力の低下や水中作業時間の制約をきたすことになる。

特に深海潜水ではヘリウム-酸素混合ガスが使われているが、ヘリウムの熱伝導率は空気に比較して大きいという、高圧ということからも熱伝導率の上昇をきたし、ダイバーの体熱損失は著しい。またウェットスーツの素材である発泡ネオプレンは、深海の圧力環境下では内部の気泡が圧縮され、保温能力の低下をきたす。図1は低温海中におけるダイバーへの水温の影響¹⁾を示す。これからもわかるように水温15℃以下になればなんらかの低温に対する保護が必要といえる。

また、日本近海表層海水の最低温度²⁾を図2に示す。沖縄、九州、四国、南紀を除いたほとんどの海域が15℃以下になる。

これらの意味から日本における潜水作業技術の開発実用化をすすめるにあたり、ダイバーの保温および加温技術の研究開発は重要といえる。

海洋科学技術センターでは、潜水作業技術の研究開発の一環として、ダイバー加温システムの研究に取り組んできた。

現在、数種のダイバー加温装置が開発されているが、それらの実用性能、適切な使用法、実用上の問題点とその対策などの運用資料が乏しいことに着目し、研究の推進にあたって、これらを実際に運用し、その使用過程で運用資料を得ることに主眼点をおいた。

すなわち、ダイバー加温システムの材料や機器

部品は、現在、すでに開発されているものを使用し、それらを潜水シミュレーターやシートピア装置 (PTC^{注1}, DDC^{注2} 支援ブイ) に有機的に組み込み、昭和51年度以降、実施した潜水シミュレーション実験ならびに60m冬期実海域潜水実験で実施に使用し、その性能および作動を確認するとともに、運用資料を収集して検討した。今回、一応の成果を得たのでここに報告する。

(注1) PTC (Personal Transfer Capsule の略、水中エレベーター)

(注2) DDC (Deck Decompression Chamber の略、船上減圧室)

2. ダイバー加温システム

今回研究を実施したダイバー加温システムは、ダイバー加温服、PTCヒーター、PTC保温材等のサブシステムからなる。

2.1. ダイバー加温服 (写真1参照)

ダイバー加温服で現在実用化されているものには、温水式加温服および電気式加温服がある。

電気式加温服は、電熱線による加温下着に20~40Vで通電し、ダイバーを温めるもので、Spirotechnique社 (フランス) 製の電気加温下着などがあり、シートピア実験で使用し、その後も、他の方式と併用されている。

温水式加温服は、支援船上に設けられた温水供給装置で約35~40℃の温水をダイバーに供給して加温するもので、加温効果が速効で温度のむらが少ないこと、感電等の心配がないなどの利点を有しているところから、現在はこの方式の加温服が多く使われている。

2.2. PTCヒーター

ダイバーの加温のほか、PTCの加温が必要で

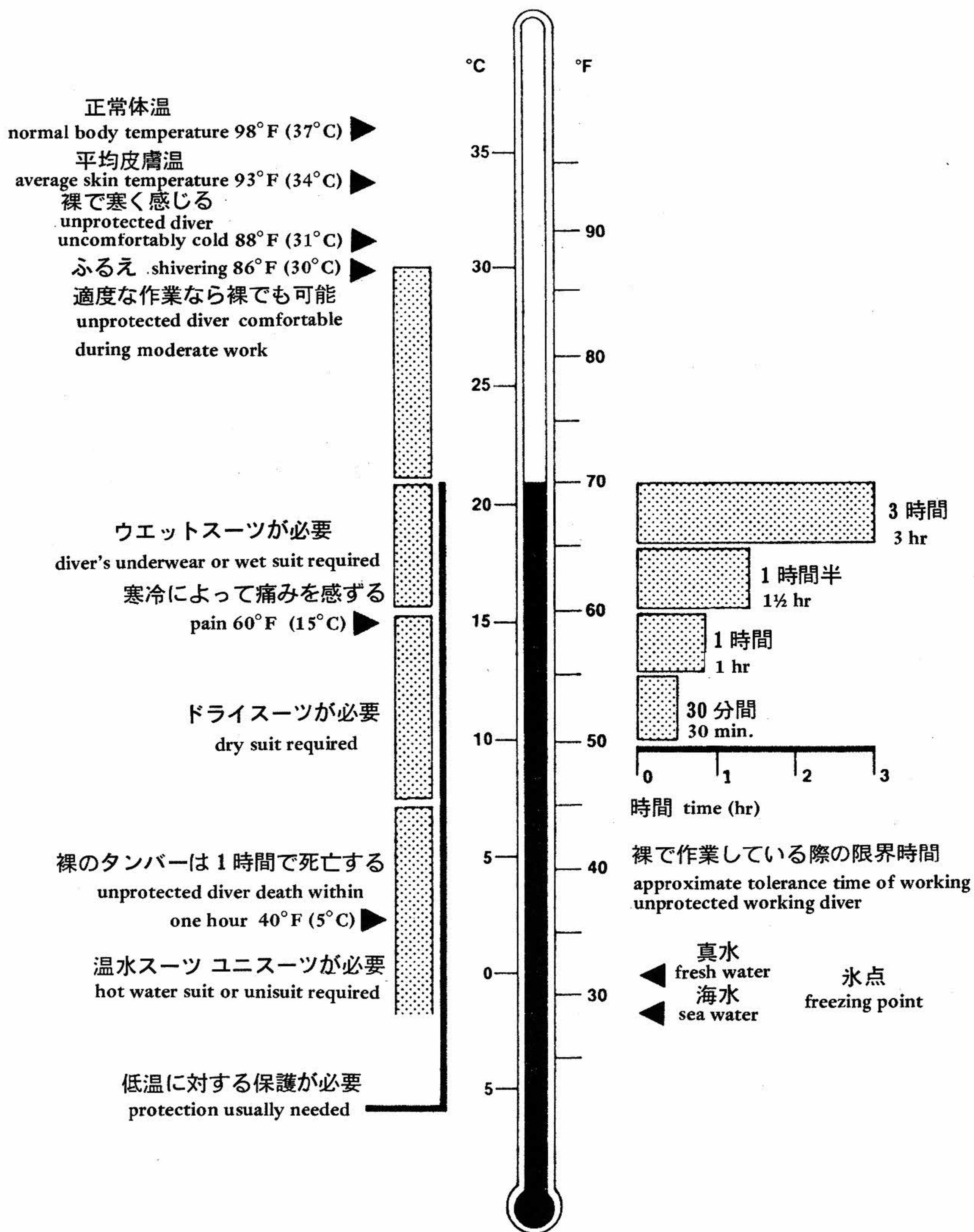


図1 ダイバーへの水温の影響

Water temperature protection chart (by US Navy diving manual, 1975)

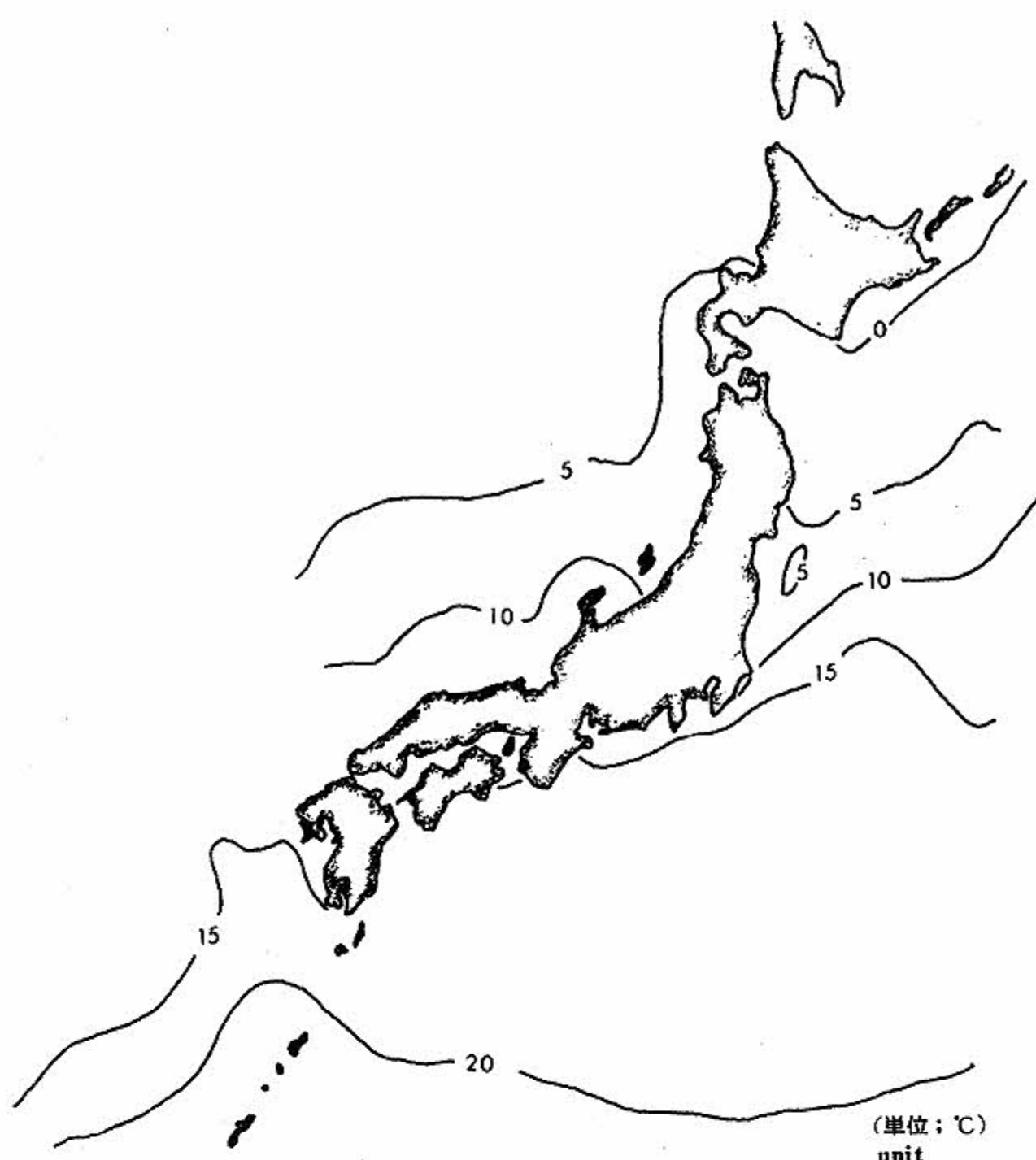


図2 日本近海表層の最低水温
Surface water temperature (lowest value) of JAPAN

ある。このことは高圧ヘリウム環境におけるダイバーの適温状態は $28\sim 32^{\circ}\text{C}$ と大気中に比較し、高温で許容範囲が狭くなることから重要な課題である。

本研究では、温水式 PTC ヒーターを採用することとした。この方式は前記のダイバー加温服用の温水を兼用できることと、電熱式のように PTC 内部に大容量の電源を持ち込む必要がなく、安全確保上にも有利であるなどの利点を有する。

2.3. PTC 保温材

PTC ヒーターの装備にともない、逃熱を防ぐための PTC 保温材が必要となる。PTC 保温材は、高圧下でも保温効果の低下のないものとしなければならない。

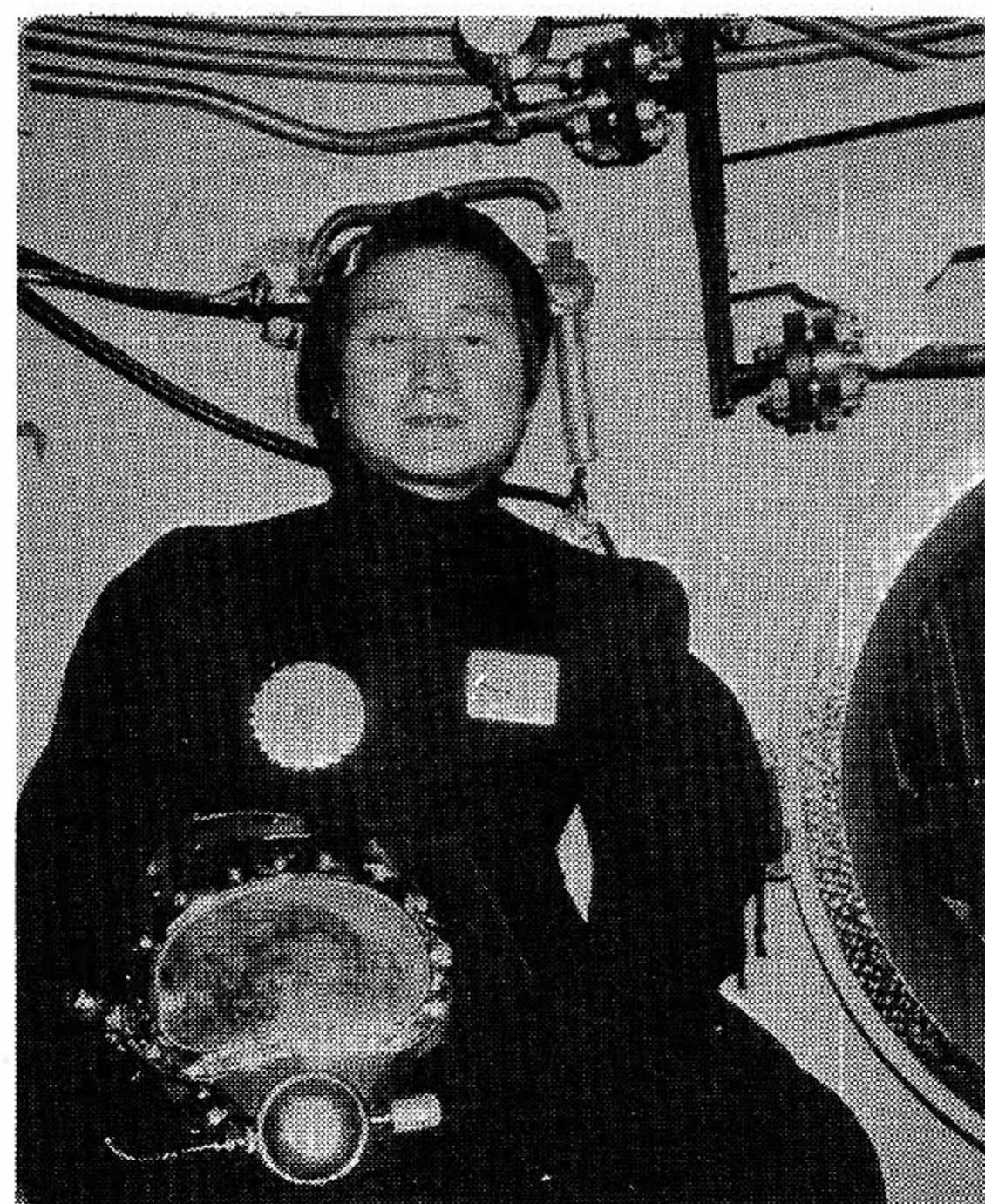
本研究では耐圧ガラスマイクロバルーンを樹脂成型した耐圧式の保温材 Eccofoat を採用し、PTC の外部にはりつける方式とした。

3. ダイバー用温水式加温服の実用試験

3.1. 温水式加温服システム

温水式加温服は1965年、米国の低水温のダムに潜水するため、使用されたものが最初である。現在、世界各国で数種類のものが実用化されている。

本研究に使用したものは米国 Diving Unlimited Int. (DUI) 社製のものである。このシステ



温水加温服
Hot water suit (Non-return suit)

ムの概略系統図を図3に示す。

3.1.1. 温水ヒーター

Econo Heater という灯油を燃料とする海水ヒーターであり、主要目は次のとおりである。

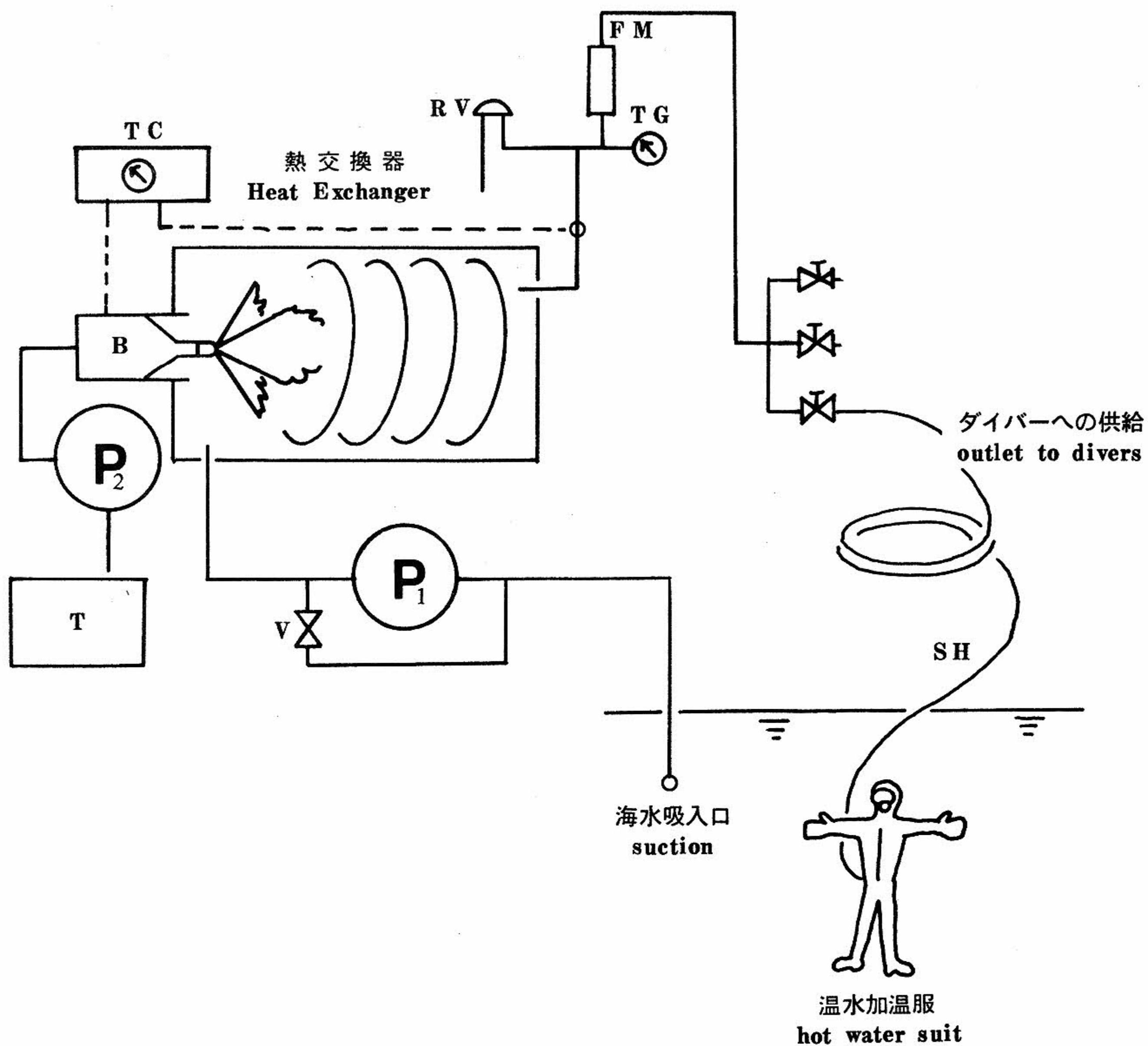
- | | |
|-----------|--|
| (1)ダイバー人数 | 2名 |
| (2)温水供給量 | 8 ℓ / min / diver,
計 16 ℓ / min |
| (3)海水入口温度 | $-2\sim 25^{\circ}\text{C}$ |
| (4)海水出口温度 | $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ |
| (5)発熱量 | 50,000 kcal / hr |
| (6)最大使用深度 | 40 m |

温水温度の検出はサーモスタットを用い、設定値に応じて、バーナーを強、弱切替え、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の精度で自動コントロールできるものである。

3.1.2. 温水加温服 (写真1)

温水加温服 (hot water suit) は、DUI 社製の Indust. Suit と Non Return Suit を使用した。

図4は温水加温服の温水チューブの配置を示す。この温水加温服は、発泡ネオプレン製のウェットスーツで身体のすみずみに、温水が分配されるようなサイズのゆとりをもたせた服内に、チューブが配管され、チューブにかけられた穴から温水が流れ出る、流れ出た温水は身体の各部を温めたのち、襟、手首、足、などから外部へ流れ出る。温水入口の腰のバルブには温水切替バルブがあり、



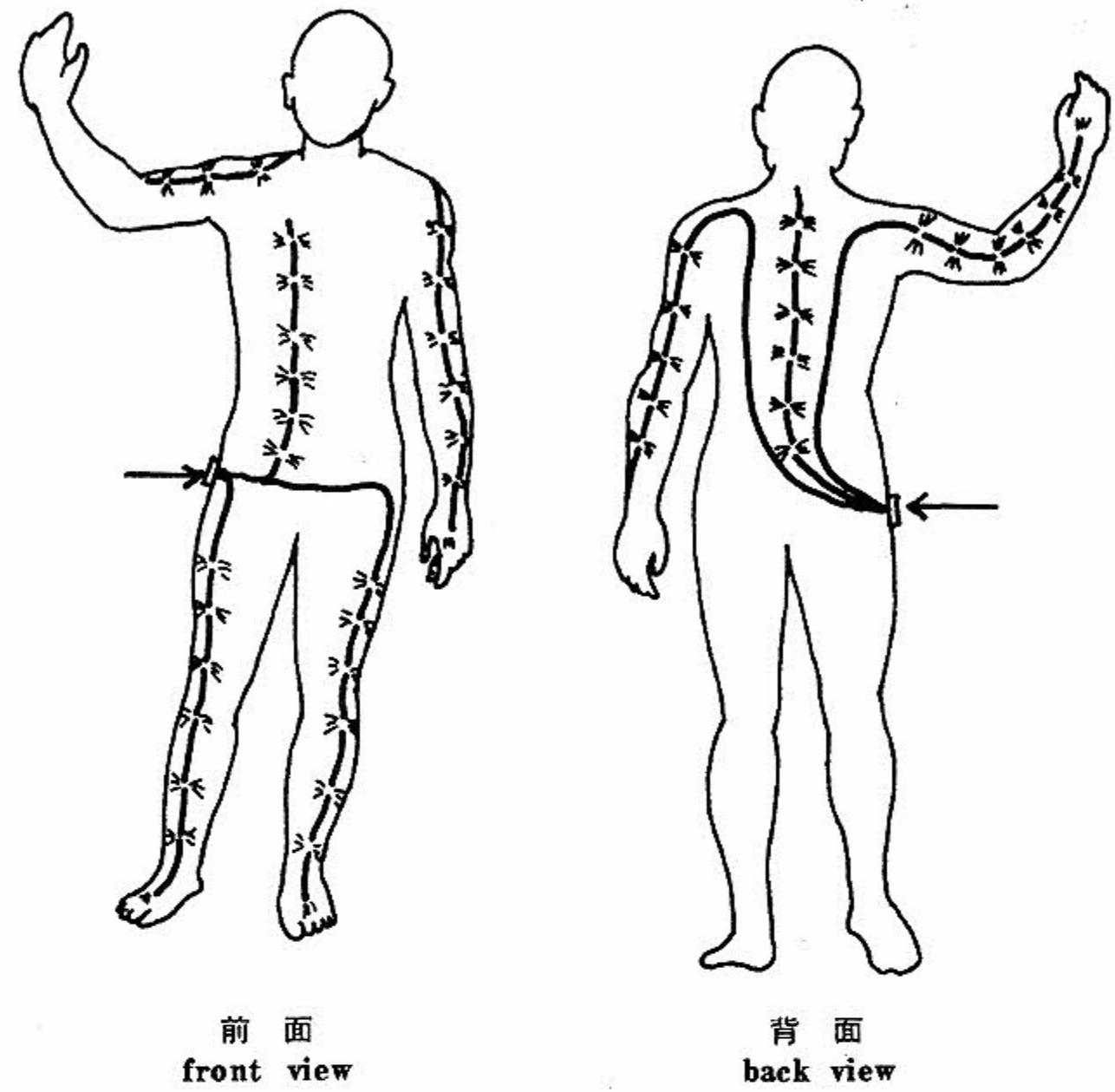
- P₁ ; 海水ポンプ, sea water pump
P₂ ; 燃料ポンプ, fuel pump
V ; 流量調節弁, flow control valve
T ; 燃料タンク, fuel tank
B ; バ ー ナ ー, burner
T.C; 温度調節器, temperature controller
RV; 安 全 弁, relief valve
FM; 流 量 計, flow meter
TG; 温 度 計, thermometer
SH; 温水供給ホース, hot water supply hose

図 3 温水式ダイバー加温服システム概略系統図
Schematic diagram of hot water diver suit system

必要に応じて温水を直接服外へ放出できるように
なっている。

図 5 は Non- Return Suit を示す。

これは温水供給が万一、停止しても、服内の温度
が急激に降下しないように襟、手首、足をシール
し、温水は胸部および足首にある温水排出弁から
外部へ放出される方式となっている。温水排出弁
は万一、温水供給が停止した場合には閉とし、暫



前面 front view
背面 back view
→ 温水チューブ, hot water tube
← 温水入口, hot water inlet

図 4 温水加温服内の温水チューブ配管

Hot water tube arrangement inside the hot water suit

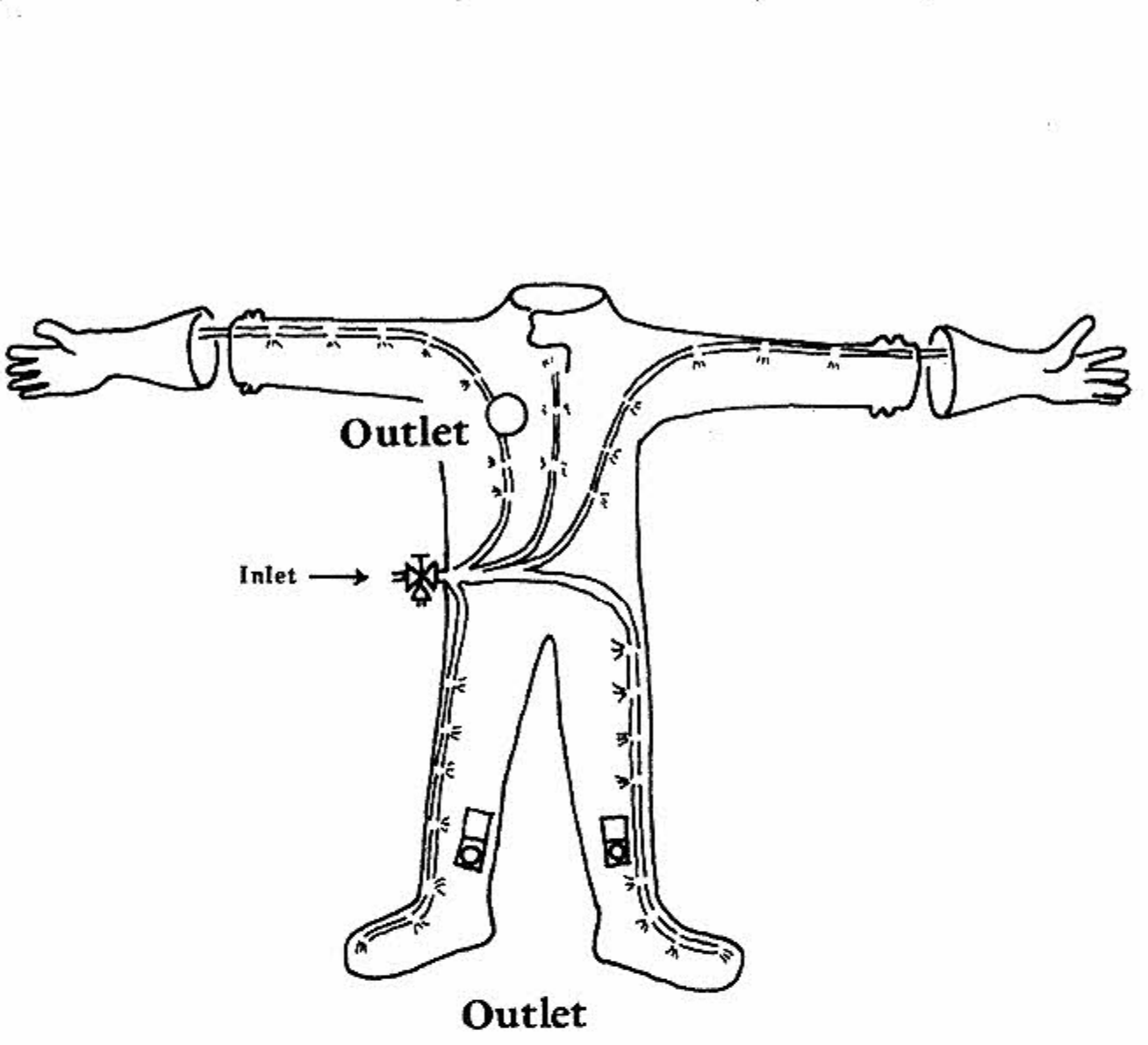
時温水を服内で保持し、温度の急激な降下を防ぐ。

このほか、基本構造は通常の温水加温服 (Ind-
ust Suit) と同様である。

3. 2. 温水加温服システム実用実験の方法

温水加温服システムの実用実験を表 1 に示すと
おり実施した。

表 1 で潜水シミュレーション実験は、毎年度順
次、深度を増大しながら実施することとし、実海域



Inlet 温水入口, hot water inlet
Outlet .. 温水排出弁, hot water outlet valve
= 温水チューブ, hot water tube

図 5 ノンリターンスーツ

Non-return suit

温水加温服システム実用実験一覧表
Hot water suit system operational test

No.	実験の種類 test	最大水深(m) max. depth	水温(℃) water temp.	実施年月 data	実施場所 situation
1	潜水シミュレーション実験 diving simulation test	140	5 ~ 10	昭和 51 年 11 ~ 12 月 (Nov.-Dec., 1976)	海洋科学技術センター 潜水シミュレーター Diving simulator, JAMSTEC
2		200	7 ~ 10	昭和 52 年 11 月 (Nov., 1977)	
3		300	7	昭和 53 年 9 月 (Sept., 1978)	
4	実海域実験 sea test	60	11 ~ 14	昭和 53 年 1 月 (Jan., 1978)	横須賀港猿島沖 Off Sarushima, Yokosuka

実験は実際の運用ということに主眼点を置いたものである。

3.2.1. 潜水シミュレーション実験

潜水シミュレーション実験の実験装置展開図を図6に示す。

ウェットチャンバーの水温は調節可能であり、それぞれ表1に示すような低温に設定した。

なお、潜水シミュレーターによる実験では、温

水を大気圧下から、高圧のチャンバー内へ押し込む必要があるため、高揚程の温水供給ポンプ（プランジャー式）を設けている。

このような装置で、潜水中のダイバーへの温水供給流量、温度、服内温度（胸、前腕、大腿、脛、さらに300 m実験時には手足を追加した）の計測をサーミスター温度計、多点温度データ集録装置を使用して行なった。

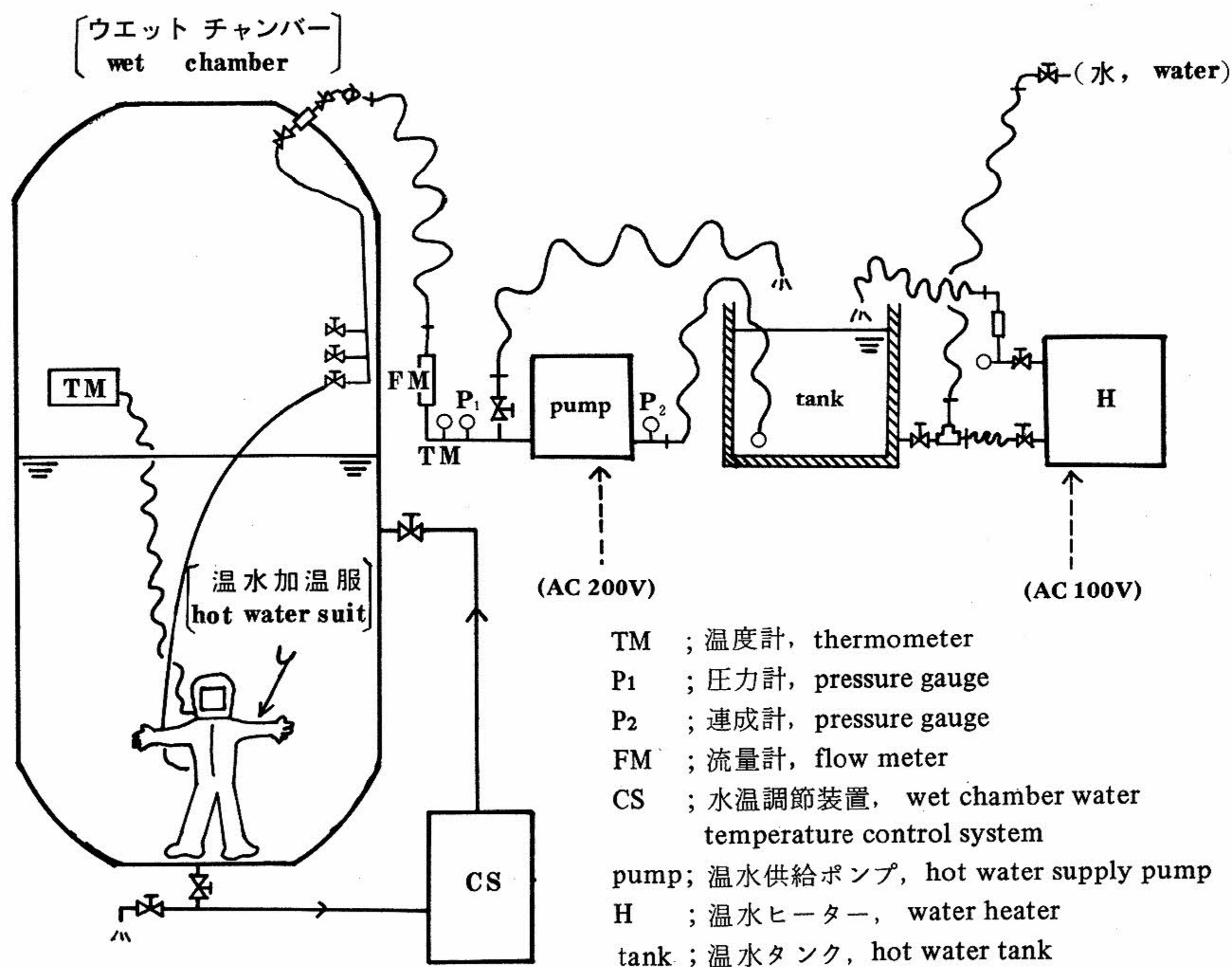
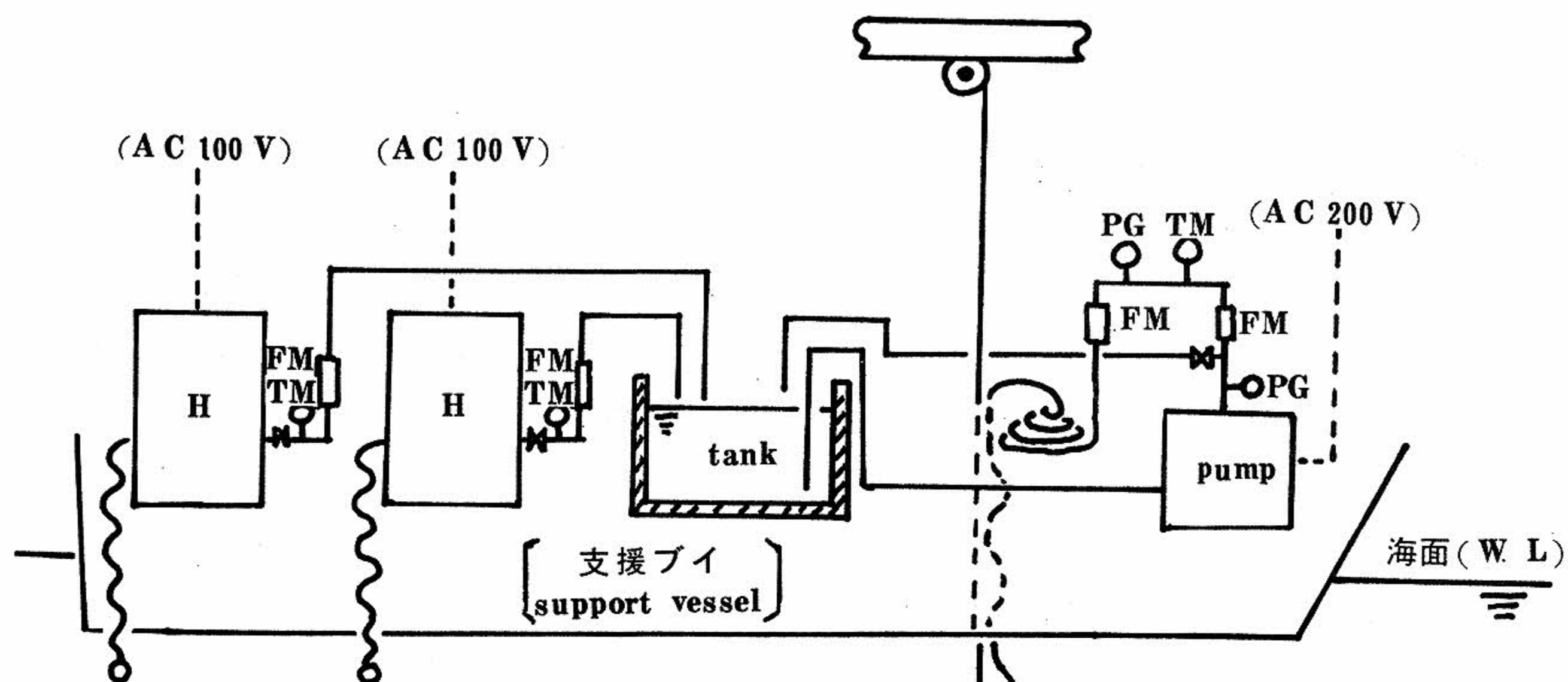


図6 潜水シミュレーション実験展開図

Hot water diver heating system simulation test



- TM ; 温度計, thermometer
 FM ; 流量計, flow meter
 PG ; 圧力計, pressure gauge
 pump; 温水供給ポンプ, hot water supply pump
 H ; 温水ヒーター, water heater
 tank ; 温水タンク, hot water tank
 hose ; 温水ホース, hot water hose
 HB ; PTC ヒーター, PTC heater
 ; 保温材, insulator

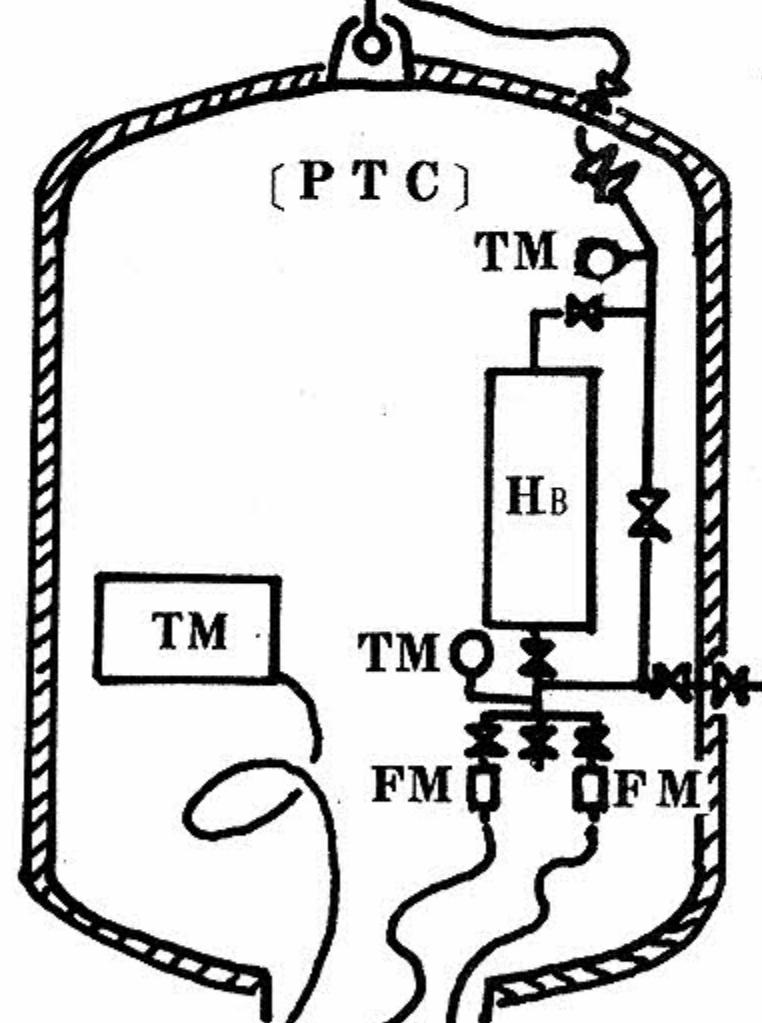


図 7 実海域の実験展開図

Hot water diver heating system sea test



表 2 温水加温服計測結果
Results of hot water suit test

No.	実験 種類	深度 (m)	計測時期	供給流量 (ℓ/min)	供給温水 温度 ($^{\circ}C$)	供給圧力 (kgf/cm^2)	服 内 温 度 ($^{\circ}C$)							水温 ($^{\circ}C$)	潜水時間 (min)	記 事
							胸	前 腕	大 腿	脛	手	足	平均※			
1	シミュレーション実験	3	51.11.30	20~21	38	1.8	33.0~ 34.7	33.4~ 36.0	33.0~ 35.0	33.0~ 34.3	—	—	33.2~ 34.8	15	62~87	(1) No. 1 ~ No. 9 の実験では電気式加温服を併用した。
2		120	51.12. 5	18~20	40~41	13.5	32.8~ 34.0	33.0~ 35.0	25.5~ 30.5	29.0~ 31.3	—	—	31.8~ 33.2	10	55~79	
3		100	51.12. 6	18~20	40~40.5	12.0	34.5~ 38.7	36.2~ 38.2	33.5~ 35.5	35.0~ 37.5	—	—	35.5~ 36.3	7	45~63	
4		100	51.12. 8	12~18	41~42	11.8	31.7~ 40.5	31.0~ 39.5	34.5~ 37.7	33.0~ 38.2	—	—	32.3~ 39.2	5	78~96	
5	シミュレーション実験	3	52.11.18	10	39	1.6	33.0~ 34.2	33.5~ 35.3	34.1~ 35.0	34.8~ 36.1	—	—	34.1~ 35.0	7	31~62	(2) 平均服内温度は3点法平均 (=0.5 胸+0.33 脛+0.17 前腕) によって計算した。 ⁴⁾
6		150	52.11.22	10~20	39	17.5	34.5~ 36.7	25.0~ 28.0	30.5~ 34.7	30.2~ 33.8	—	—	32.7~ 35.0	10	30~60	
7		150	52.11.26	12	44	16.8	30.1~ 33.7	30.7~ 35.4	34.2~ 35.6	32.5~ 37.1	—	—	32.5~ 35.2	7	30~62	
8		200	52.11.29	13	43	22.7	31.7~ 33.8	31.0~ 35.0	33.4~ 35.4	33.2~ 36.8	—	—	33.4~ 35.3	7	21~61	
9		200	52.11.29	12	44	23.2	33.0~ 34.2	32.1~ 35.3	33.3~ 36.4	33.7~ 37.1	—	—	33.2~ 35.0	7	13~61	
10	実海域実験	54	53. 1.12	14	38	5	30.0~ 30.4	31.4~ 32.2	29.5~ 29.8	30.2~ 31.0	—	—	30.4~ 30.8	13	30	
11		58	53. 1.13	19	43~49.5	6.5~7.5	34.2~ 36.3	35.2~ 40.0	30.7~ 33.6	28.1~ 28.5	—	—	32.2~ 34.7	13~14	60	
12		58	53. 1.16	12~17	45~48	3~6	26.8~ 33.5	31.0~ 35.8	24.0~ 31.6	27.2~ 31.2	—	—	28.0~ 33.0	11~13	30	
13	シミュレーション実験	300	53. 9.19	17	40~42	33	37.0~ 38.8	28.5~ 35.6	28.4~ 37.6	37.6~ 39.6	33.2~ 39.2	34.2~ 39.8	35.1~ 38.1	7	26~28	
14		300	53. 9.26	17	41	32.1	25.5~ 38.4	35.5~ 39.6	34.5~ 37.5	39.5~ 40.6	38.2~ 40.4	37.7~ 40.7	34.5~ 38.5	7	20~25	
15		300	53. 9.28	15	40	32.5	32.2~ 37.5	29.7~ 39.0	26.7~ 36.0	26.3~ 33.6	29.7~ 38.5	—	30.3~ 35.9	7	10~29	

3.2.2 実海域実験

実海域実験の展開図を図7に示す。

温水ヒーター (Econo Heater) は、PTC 加温の併用、故障時のバックアップ等を考慮して2台設置し、温水は一旦温水、タンクに溜め、温水供給ポンプ (ダイヤフラム式) でPTC に供給した。PTC に送られた温水は温水式 PTC ヒーターを経由してダイバー2名に送られる。このような装置で冬期の低水温下で潜水作業を実施した。

この間、加温服の服内温度を計測するとともに、温水ホースの熱損失および抵抗の計測を実施した。

3.3. 温水加温服実験結果

各実験で温水式加温服システムは、各部共に良好に作動し、所定の計測を行うことができた。

シミュレーション実験および実海域実験の計測結果の代表例をまとめて表2に示す。また実海域実験における温水の流量、温度、供給圧力のより詳細なデータを表3に示す。

潜水中の服内温度の変動の様子を図8に示す。図8から服内温度はほぼ33~38℃の間に保持されており、ダイバー加温が適切に行われていることがわかる。

3.4. 温水加温服実験結果の考察

3.4.1. 温水加温服の効果の評価

表2のNo.1~9の実験では温水加温服のほか、電気式加温服 (Spirotechnique 社製加温下着600w) を合わせて使用して比較した。

電気式加温服では、水温7℃では、寒さのため20minの作業が限度であったが、温水加温服では水温5℃で96minの作業を終えても、まだ作業を続ける余裕があるなど、温水加温服の方がより有効なことが確認された。特に温水供給後、ただちに加温効果が出てくる速効性および服内温度分布の幅が比較的小さいなど、大きな効果を有することが確認された。

しかし、実験の中には“のぼせ”など、湯あたり現象もみられたことから、服内温度は30~36℃を適温とし、体温の37℃よりも高くすることはさけるべきであると言えよう。

(1) 手、足など末端部の加温効果

潜水作業を有効に行うには、手、足末端部の加温が重要である。

温水加温服では図4および図5に示すように、グローブおよびブーツの中にも、温水が供給され

表3 実海域実験計測結果 (流量, 温度, 抵抗)
Results of hot water suit sea-test (flow rate, temperature, pressure)

No.	月日 date	流 量 flow rate (ℓ / min)	温 度 temp (°C)			供給圧力 delivery pressure dressvre (kgf/cm^2)	記 事
			ホース入口 hose inlet T_1	海 水 sea water T_2	ホース出口 hose outlet T_3		
1	1975年 1. 12	14	38	13	35	5	実験時にはいずれも 温水ホース100 mの うち60 mが海水に 浸っている。
2	1. 13	19	49.5	14	44	7.5	
3	1. 13	19	43	13	41	6.5	
4	1. 16	13	46	13	38	4	
5	1. 16	12	45	11	39	3	
6	1. 16	17	48	11	43	6	

る方式である。

表2のNo.13およびNo.14でわかるように、手、足の末端部の温度は平均服内温とほぼ等しい温度になっており、作業機能保持の上からすぐれていることが確認された。

(2) 温水停止後の温度変化

表2のNo.15は温水供給系のトラブルを想定し、温水を一時停止して服内温度の変化を測定した。

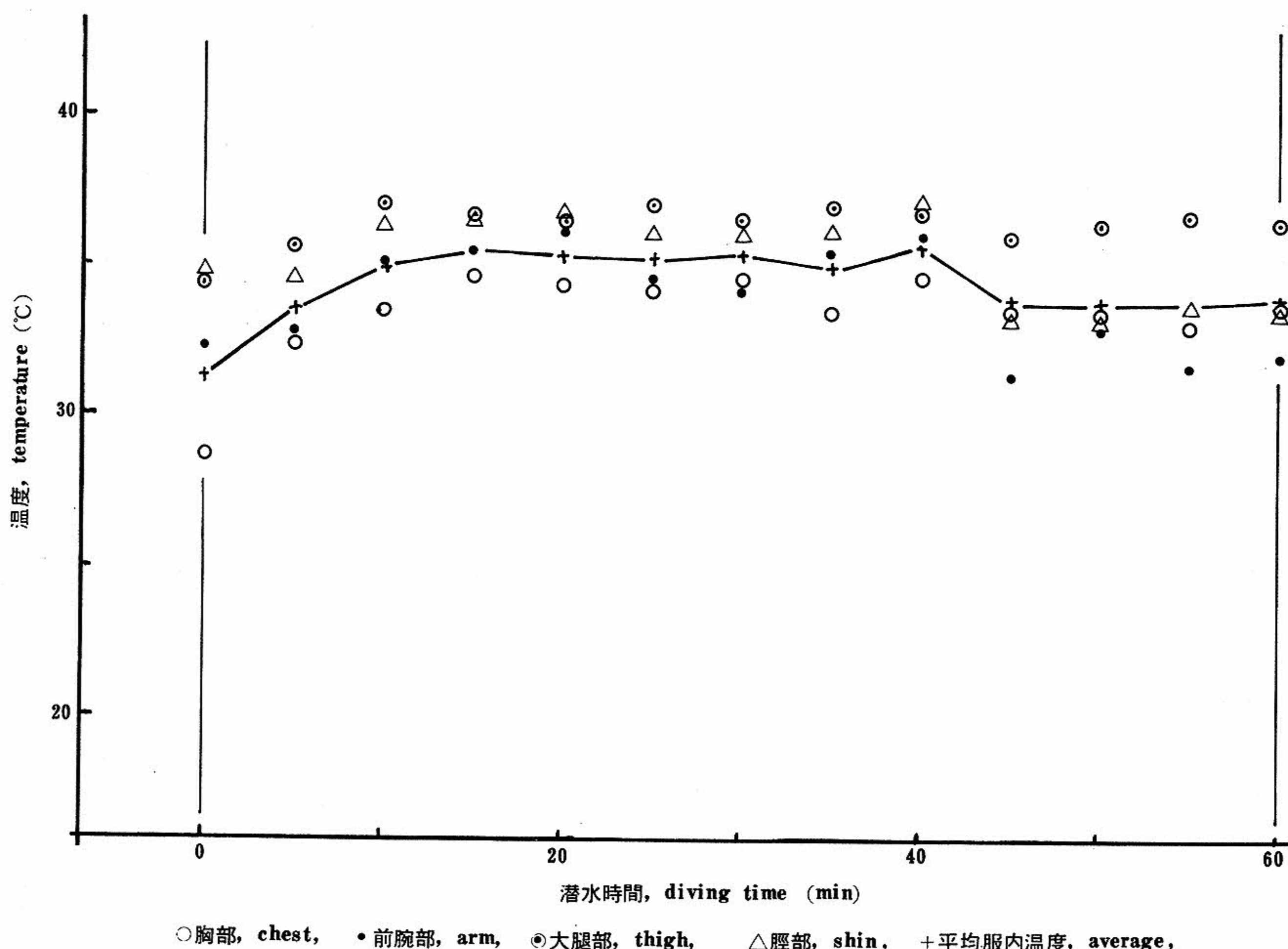
この結果を図9に示す。温度低下はかなり速かで5℃降下するのに、Non-Return Suitで6minである。このことからダイバーは温水停止に気

が付いたらSDC^{注3}など、安全な場所へただちに戻らなければならない。

(注3) SDC (Submersible Decompression Chamber の略, 加減圧装置付き水中エレベーター)

3.4.2. 温水ホースの流体抵抗

温水を供給するにあたり、流体抵抗にもとづく、圧力損失は温水供給ポンプの吐出圧に相当する。このなかでも、温水ホースの抵抗が主なものである。温水ホースの抵抗 (P kgf/cm²) と流量 (Q m³/sec) の関係は、つぎのようである。



年月日, date: 昭和52年11月29日
(29 Nov. 1977)

水深, depth: 200m

水温, water temperature: 7°C

供給温水, hot water supply: 温度, temperature
43°C, 流量, flow rate, 13ℓ/min

図8 加温服内温度計測結果の例

An example of temperature measurement result inside the suits

$$P = \frac{r}{2g} \cdot f \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \left(\frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} \right)^2$$

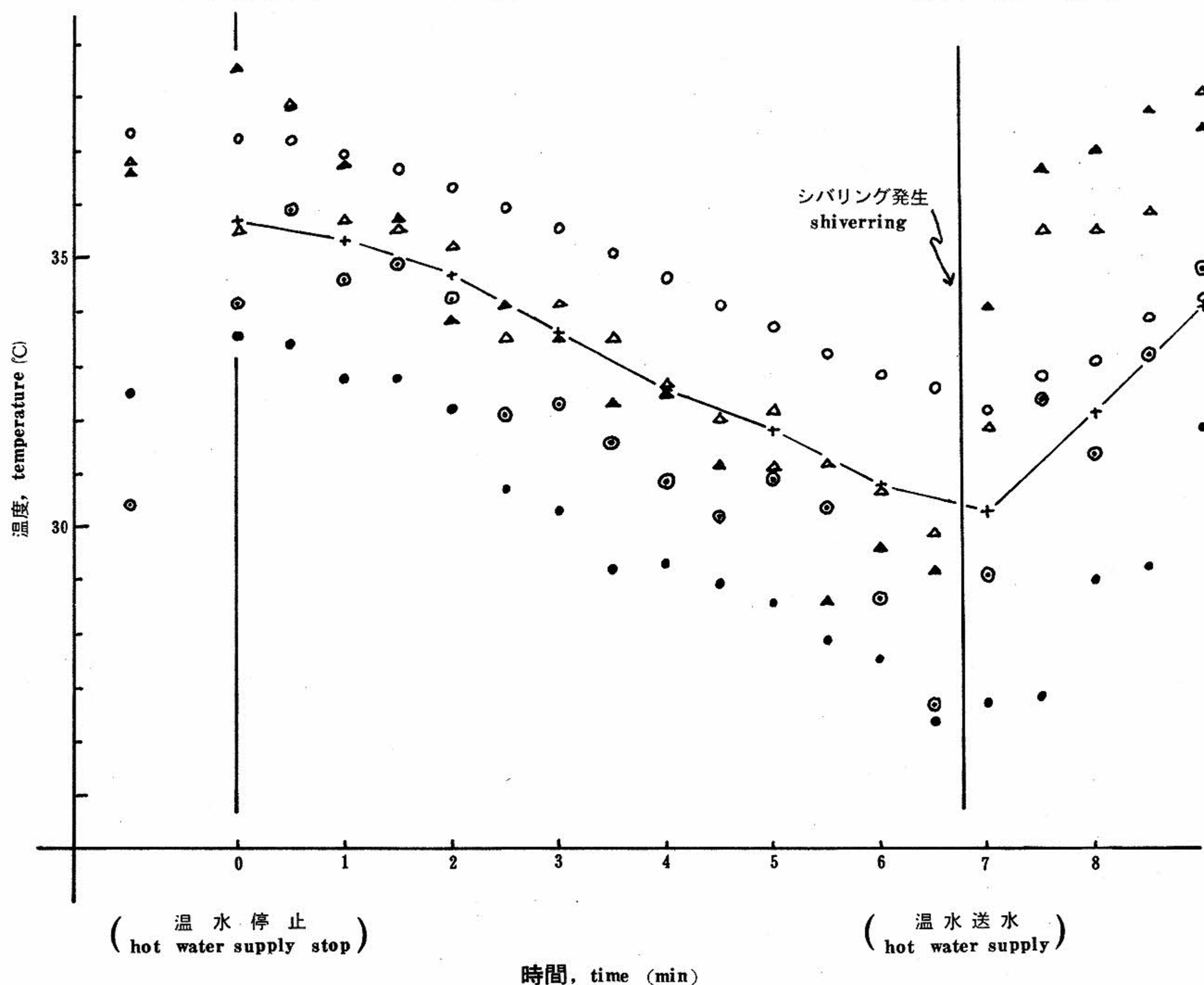
(ダルシー・ワイズハッパ式)(1)

ここに r ; 海水密度, 1025 kg/m^3
 g ; 重力加速度, 980 m/s^2
 ℓ ; ホースの長さ, 100 m
 d ; ホース内径, $2.7 \text{ mm} = 0.0127 \text{ m}$
 f ; 管摩擦係数, $0.3164 \text{ Re}^{-1/4}$

(ブラジウスの式)
 Re ; レイノルズ数;

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu} = \frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} \right) d}{\nu}$$

ν ; 海水の動粘性係数,
 $0.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



年月日, date ; 昭和 53 年 9 月 28 日
 (28 Sept. 1978)

水深, depth ; 300m

水温, water temperature ; 7°C

供給温水, hot water supply ; 温度, temperature ; 40°C

流量, flow rate; 15 l/min

潜水服, diver suit ; Non-return suit

図 9 温水停止時の服内温度

Temperature change inside the suit when hot water supply is stopped

上式によって計算した P (kgf/cm^2) $\sim Q$ (ℓ/min) 曲線を図10に示す。この図には表3から温水供給ポンプの吐出圧力の計測結果のプロットも合わせて示す。実測値は計算値とはほぼ合致しているといえる。

なお、実測値が計算値よりも若干上回っているのは、ホースの抵抗以外に弁や PTC ヒーターの抵抗も含まれているためと推定される。

3.4.3. 温水ホースの熱損失

海水に浸った温水ホースからの逃熱について解析する。

今、ホースの逃熱モデルを図11のように考え、この長さ dl の部分において温度降下 dt がある場合の熱平衡を考える。

$$\text{入熱量} ; H_1 = m \cdot c \cdot dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに $m = \text{流量} (\text{kg/s})$

$c = \text{比熱} (\text{kcal/kg})$

逃熱量 (円筒面からの逃熱) ;

$$H_2 = 2 \pi \cdot \lambda \cdot \frac{t - t_2}{\ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} dl \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに λ : ホース材質の熱伝導率
($\text{kcal/sm}^\circ\text{C}$)

d_1 : ホースの内径 (m)

d_2 : ホースの外径 (m)

t : 温度 ($^\circ\text{C}$)

$$H_1 + H_2 = 0$$

とすれば,

$$m \cdot c \cdot dt = - 2 \pi \lambda \frac{t - t_2}{\ln(d_2/d_1)} \cdot dl \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式を積分して,

$\ell = 0$ で $t = t_1$ (入口温度)

$\ell = L$ で $t = t_3$ (出口温度)

の条件を入れると次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} &= e^{\frac{2 \pi \cdot \lambda \cdot L}{m \cdot c \cdot \ln(d_2/d_1)}} \\ &= e^{\frac{367.9 \lambda \cdot L}{Q \cdot c \cdot \ln(d_2/d_1)}} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし、 Q : 流量 (ℓ/min) である。
ここで各記号の数値はつぎのようである。

$$c = 1 \text{ kcal/kg}$$

$$d_2 = 0.03175 \text{ m}$$

$$d_1 = 0.0127 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

$$\lambda = 4.96 \times 10^{-5} \text{ kcal/m} \cdot \text{s}^\circ\text{C}$$

$$Q = \text{流量} (\ell/\text{min})$$

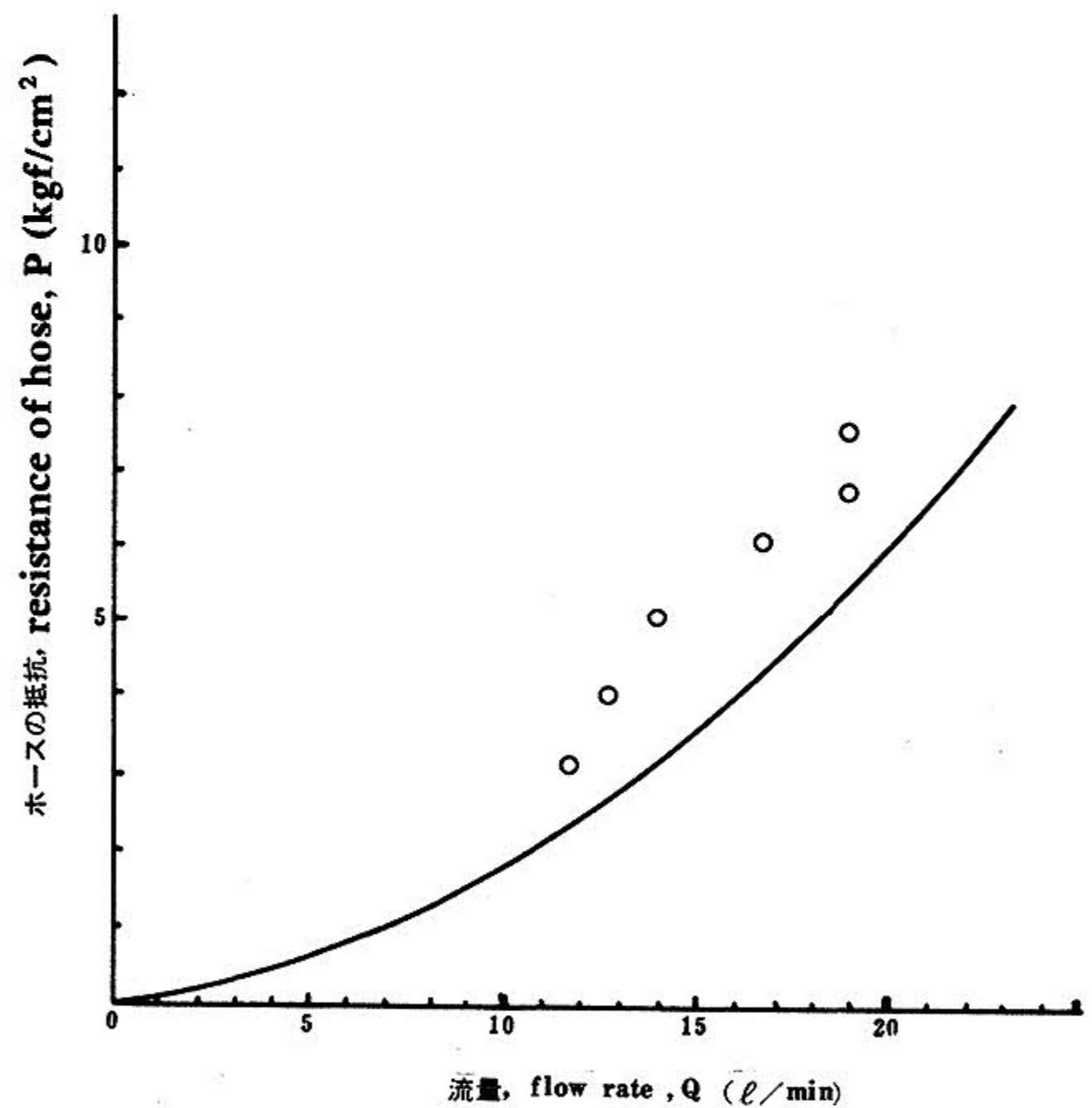
これらの数値により(5)式の温度差比 $\left[(t_1 - t_2) / (t_3 - t_2) \right]$ を計算した結果を図12に示す。

この図には表3の計測結果から求めた温度差の比のプロットを重ねて示す。計算値と実測値はほぼ合致していることがわかる。

4. 温水式 PTC ヒーターの実海域実験

4.1. 実験装置と実験要領

温水式 PTC ヒーターの実海域実験は、昭和53年1月11日～1月16日横須賀港猿島沖で実施した実海域実験中に行った。



ホース, hose

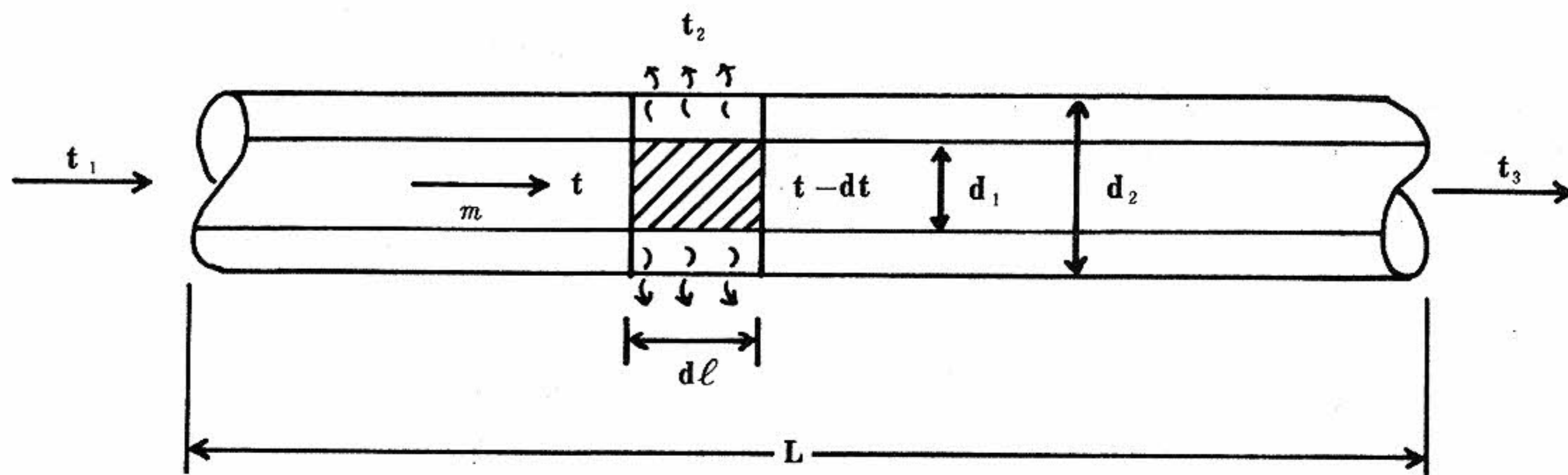
内径, inside diameter: 12.7mm

長さ, length; 100m

○実測値, measured value

— 計算曲線, calculated curve

図10 温水ホースの抵抗計算曲線と実測値
Resistance of hose calculated curve and measured value



ℓ および L ; ホースの長さ, hose length

t_1 ; 入口温度, inlet temperature

t_2 ; 周囲の海水温度, sea water temperature

t_3 ; 出口温度, outlet temperature

t ; 温度, temperature

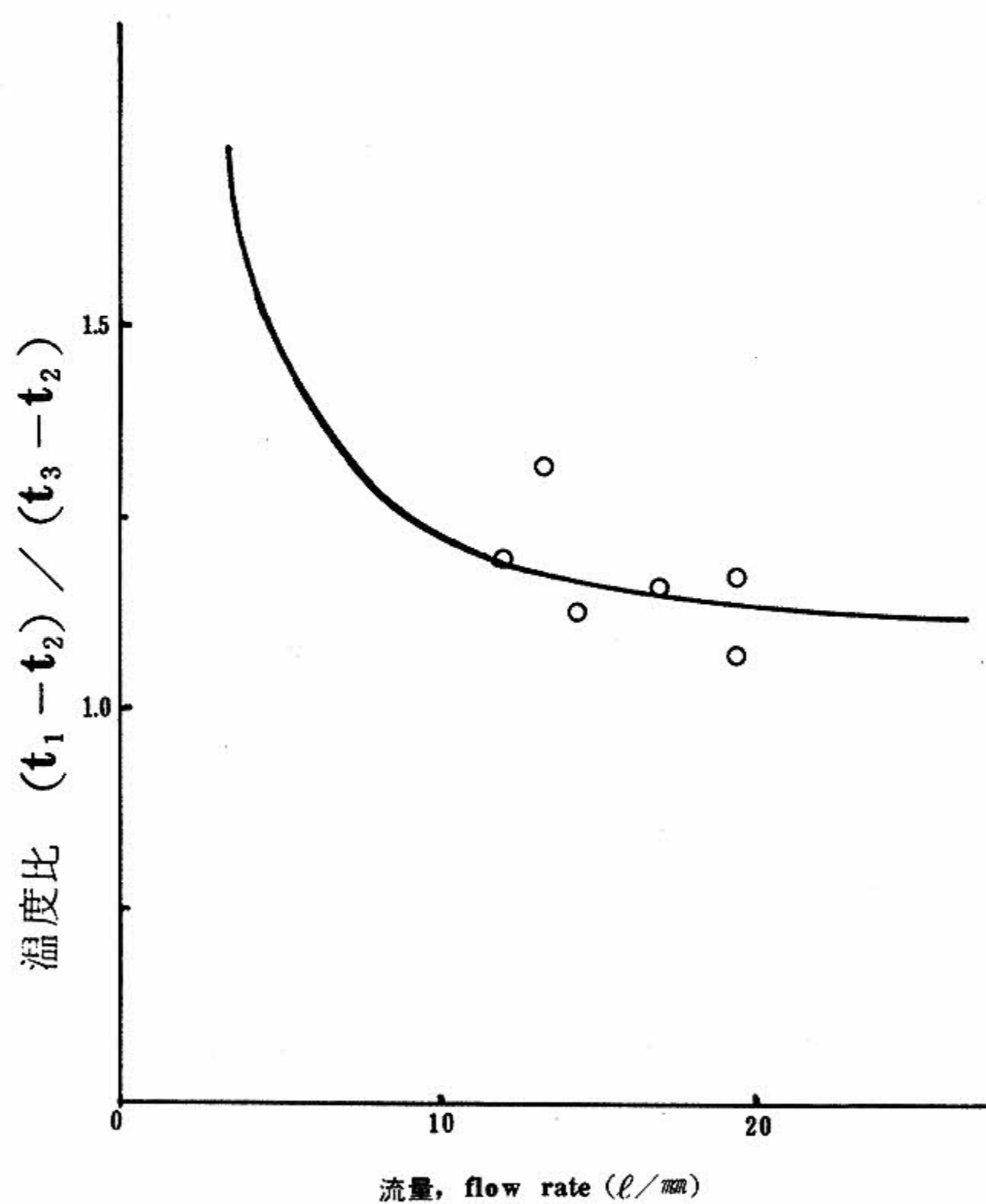
m ; 流速, flow velocity

d_1 ; ホースの内径, hose inside diameter

d_2 ; ホースの外径, hose outside diameter

図 11 ホースからの熱損失モデル

Model of heat loss from hose



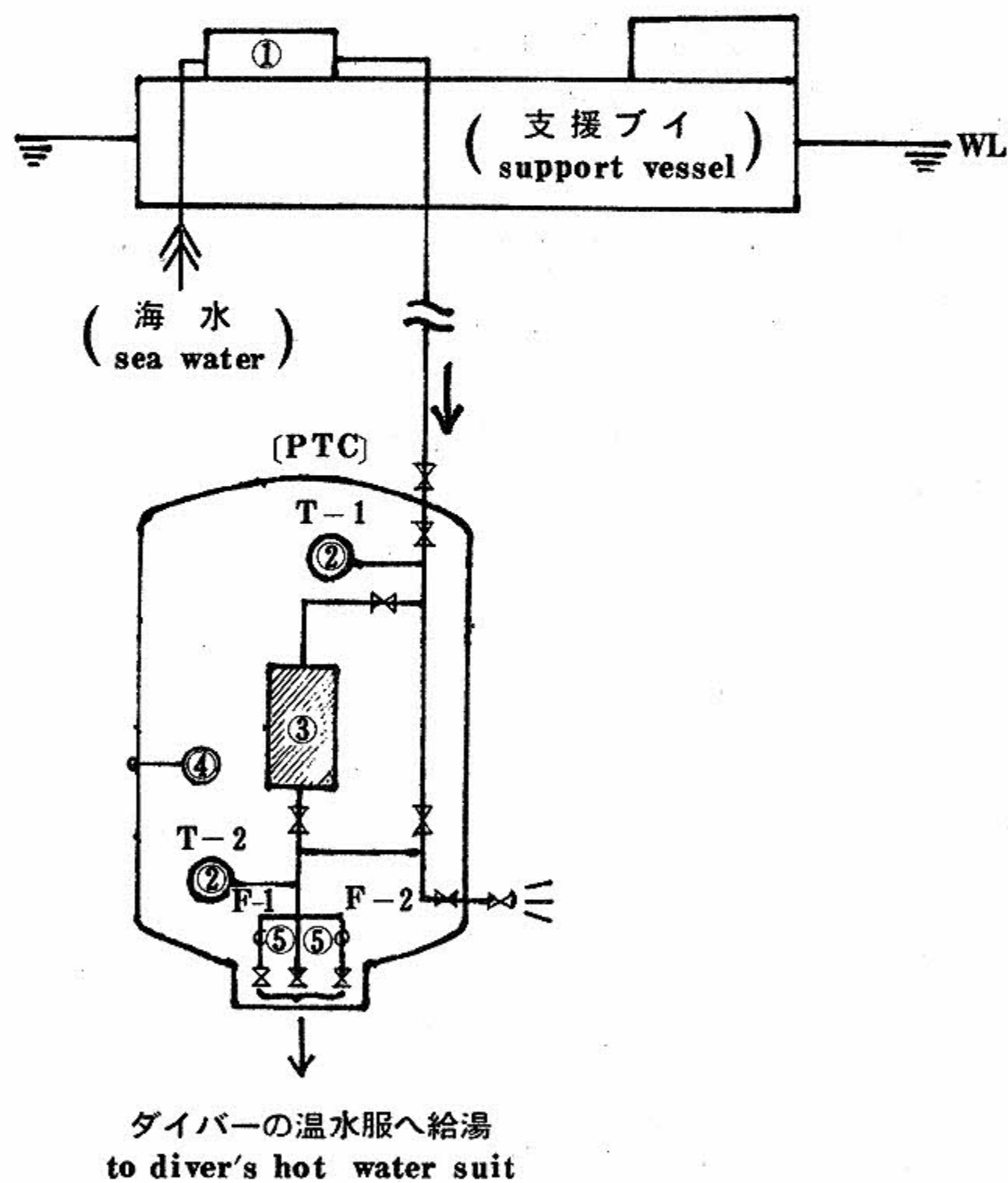
$(t_1 - t_2) / (t_3 - t_2)$ = 温度差の比, ratio of temperature difference

○ 実測値, measured value,

— 計算曲線, calculated curve

図 12 ホースからの熱損失計算曲線と実測値

Heat loss from hose calculated curve and measured value



1. 温水供給装置, hot water supply system

2. 温度計, thermometer

3. 温水式ヒーター, hot water PTC heater

4. 外海温度計, sea water thermometer

5. 流量計, flowmeter

図 13 PTCヒーター温水系統

PTC heater hot water system diagram

4.1.1 温水ライン

温水系統は、図13に示す通りである。また、PTC ヒーターの装備状態を写真2に示す。

温水は支援ブイに設置された温水供給装置から温水ホースを経て、PTC に供給される。PTC に入った温水は、温水式 PTC ヒーターを経て、その後、次の2系統のいずれかに流れる。

- (1) PTC から海中に直接排出される
- (2) ダイバーの温水服に給湯される

4.1.2 計測方法

本装置の性能を定量的に把握し、運用資料とするため、入力である温水温度、温水流量および出力である PTC 内温度を計測した。なお、パラメーターとして、海水温度を計測した。

(1) PTC 外海水温：

PTC 内に装備された温度計（測温抵抗体式）によって外海水温を測定する。

(2) 温水温度：

温水ラインの途中に設置された2個の温度計（測温抵抗体式）T-1，およびT-2によって、それぞれヒーターの入口および出口の温水温度を計測する（写真3および写真4参照）。

(3) PTC 内温度：

計測者がサーミスタ温度計のセンサーを、上、中、下の各部に移動して PTC 内の3箇所の温度を計測する。

4.1.3 使用機器

(1) 温水式 PTC ヒーター：

ファン内蔵、フィンコイル式の熱交換器であり、温水を供給してファンによる気流と熱交換せしめ、ガスを暖めるものである。

製造メーカー：Kinergetics Inc. (米)

主要目：

必要電源；AC または DC 24 ± 1 V

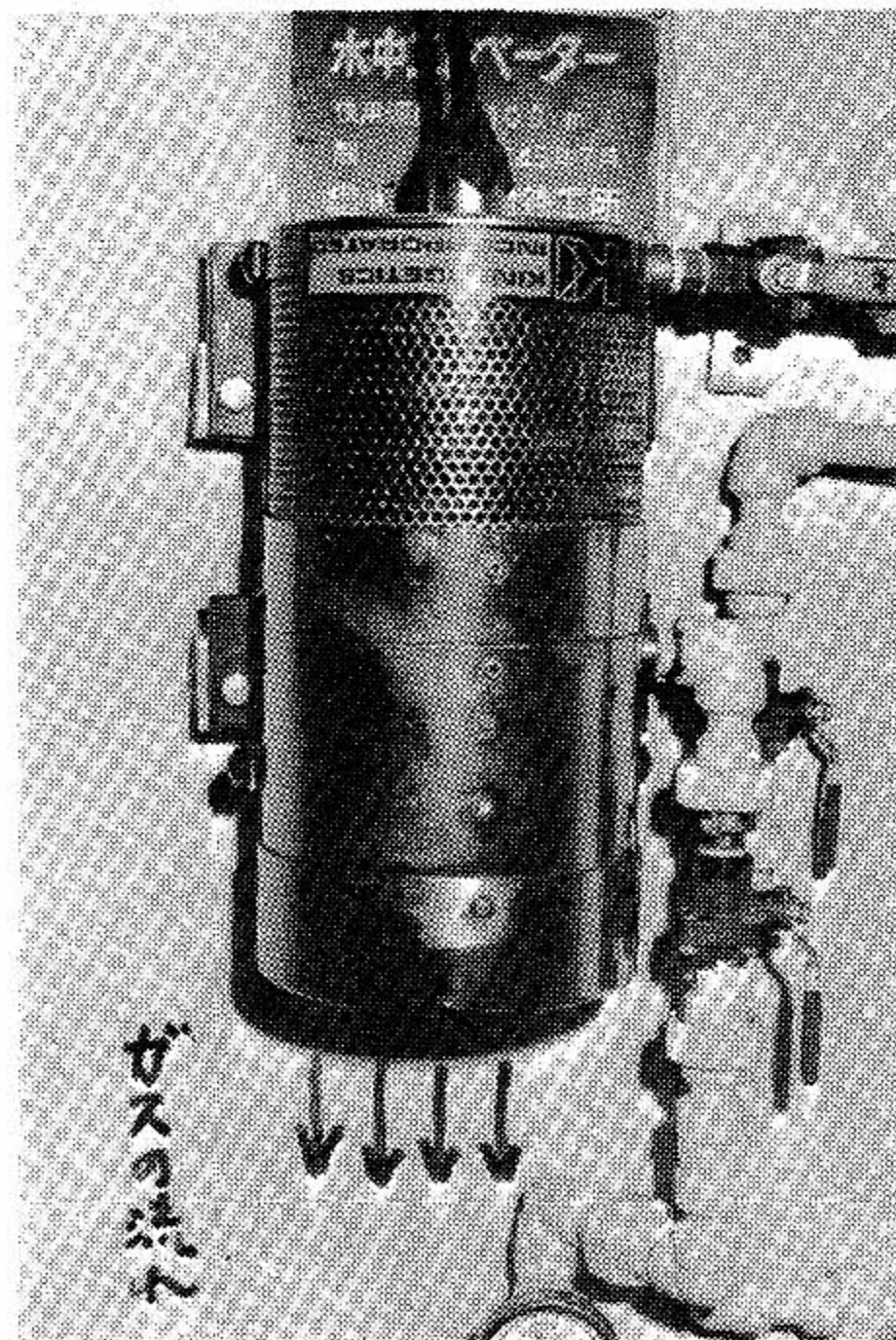


写真2 温水式ヒーターのPTC内装備状態

Hot water bell heater installed in the PTC

2 A, 48W

供給温水；7.6～22.7 ℓ/min at 60～69℃

ガス流量；100 ft³/min (2.8 m³/min)

at 1 atm

寸 法；長さ約39cm，直径約20cm

(2) 流量計 (写真3 参照)：

計測範囲；0～10 Gal/min (0～38 ℓ/min)

作動圧力；最大 3000 psi (210 kgf/cm²)

4.2. PTC ヒーター実験の成果

4.2.1. 計測結果

PTC ヒーターおよび計測用装置は，各部共，良好に作動し，所定の計測を行うことができた。

PTC が水面下に水没したのち，温水供給を開始し，PTCが上昇し，支援ブイのウェルから揚収されたときをもって供給を終了する。

この間，PTC 内温度測定は，PTC が海底に到着し，ハッチを開放した状態で実施した。この時点では温水温度はほぼ一定であった。

その計測結果を表4に示す。

この表の計測結果から PTC 内温度は上昇中であることがわかる。

4.2.2. PTC ヒーター実験結果の考察

(1)熱計算

PTC 外への貫流熱量 Q と PTC 内での発熱量 Q_T を計算する。

$$Q = K (t_A - t_B) \cdot S \dots\dots\dots (6)$$

ここに Q ；貫流熱量 (kcal/hr)

K ；熱貫流率 (kcal/m²・hr・℃)

t_A ；PTC 内部温度 (℃)

t_B ；外海水温 (℃)

S ；PTC 外壁面積 (m²)

K は後述の“PTC 保温材の断熱効果”の計測値から $K = 9.30$ (kcal/m²・hr・℃) とする。 t_A および t_B は計測結果から， $t_A = 19.17$ (℃)， $t_B = 11.50$ (℃)，および $S = 13.4$ (m²) である。

以上によって(5)式を計算すると，

$$Q = 9.30 \times 7.67 \times 13.4 = 956 \text{ (kcal/hr)}$$

一方，発熱量 Q_T は，

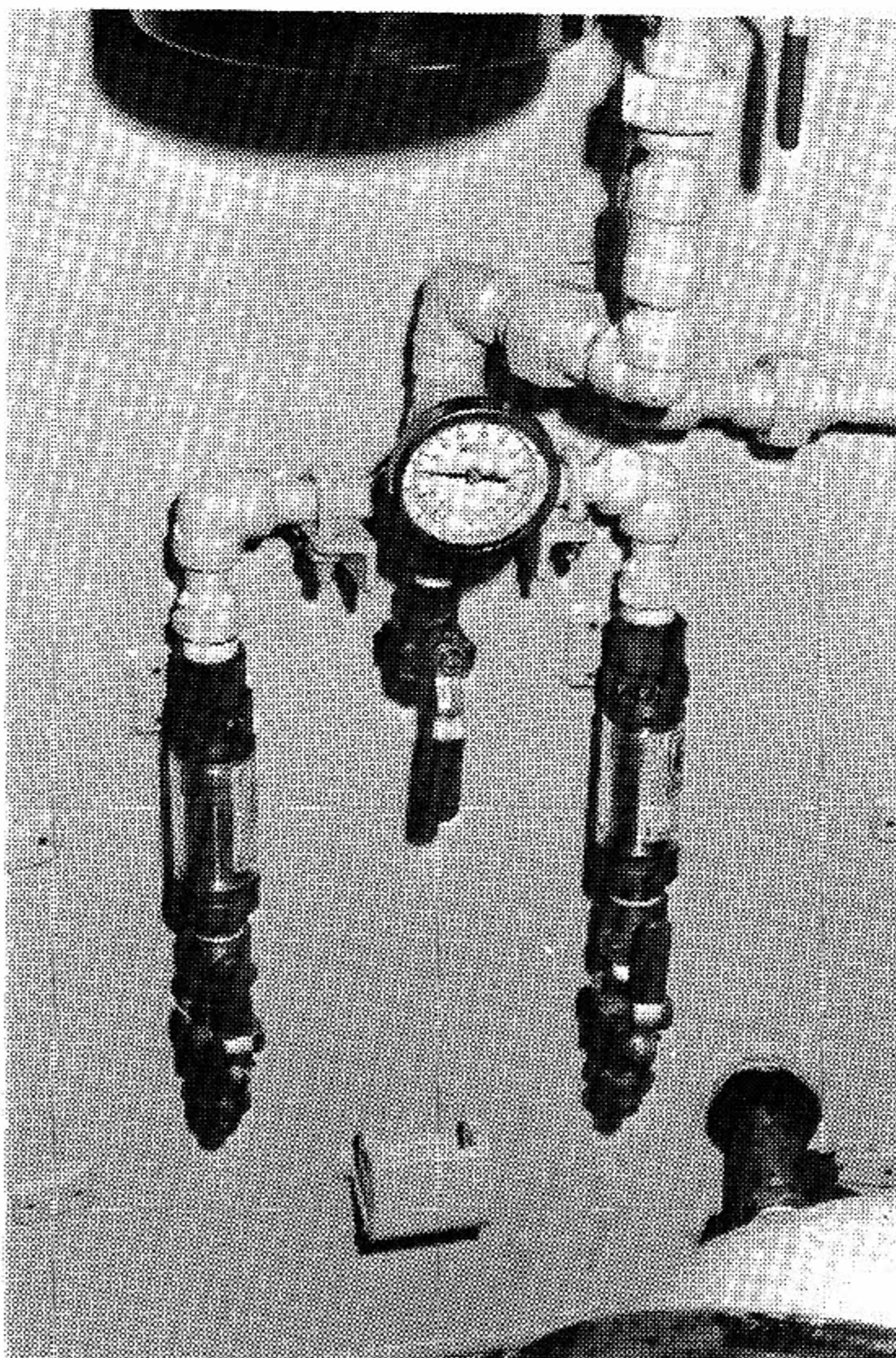


写真3 流量計 (左右の2個) と温度計
Flow meter and thermometer

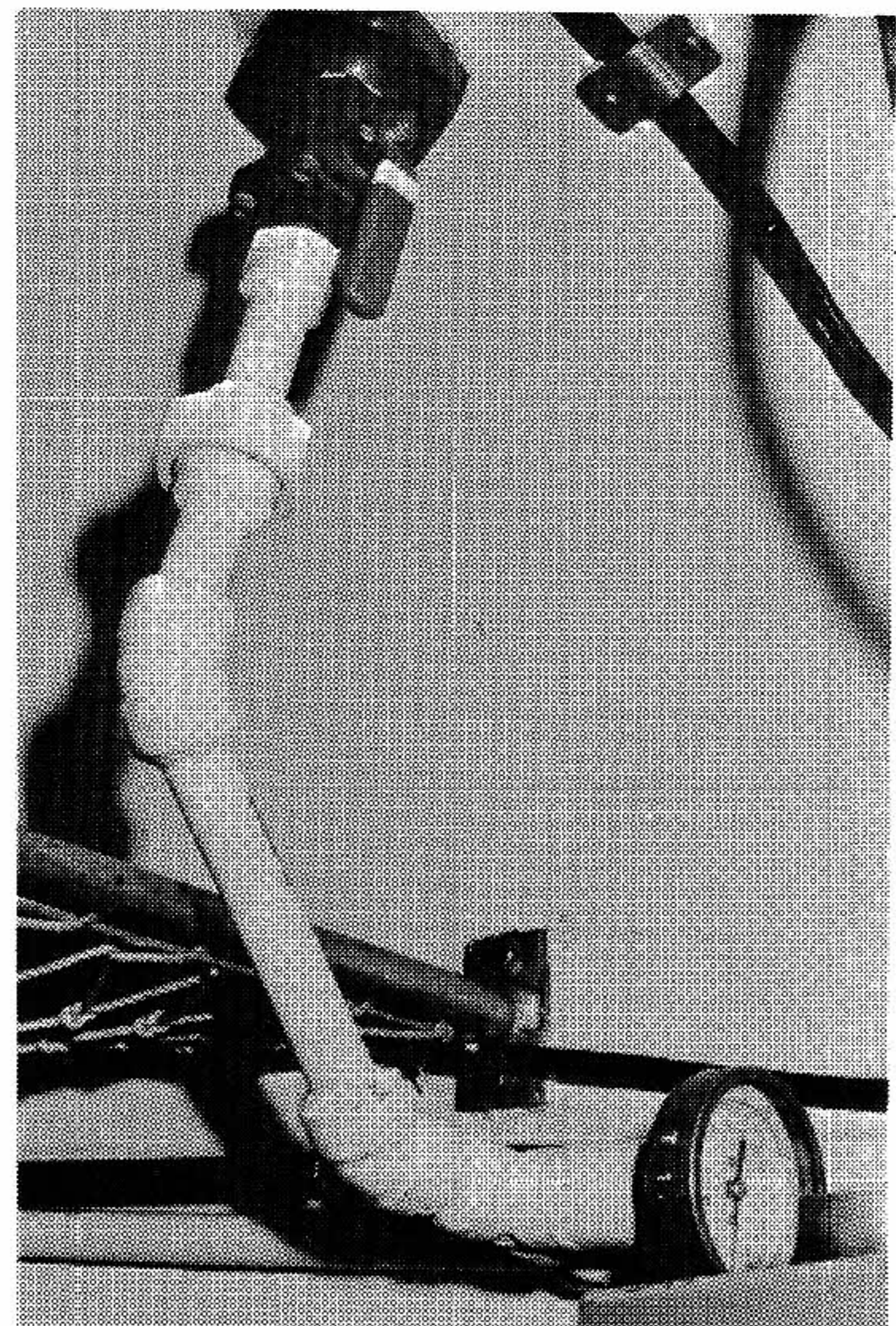


写真4 PTC 温水入口部分と温度計
Thermometer at inlet of hot water

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 Q_1 = 温水ヒーターの発熱量 (kcal/hr)

Q_2 = 人体よりの発熱量 (kcal/hr)

Q_3 = PTC 内機器発熱量 (kcal/hr)

温水ヒーターの発熱量 Q_1 は、図14の温水ヒーターの特性曲線において、計測値から平均温水温度 37.7°C 、平均送水流量 = 20.4 l/min (= 5.4 Gal/min) の値から、

$$Q_1 = 9.540 (\text{BTV/hr}) = 2.404 (\text{kcal/hr})$$

次に人体よりの発熱量 Q_2 は $100\text{kcal/hr} \cdot \text{man}$ として、計測時 PTC 内 2 人であったので、

$$Q_2 = 100 \times 2 (\text{人}) = 200 (\text{kcal/hr})$$

最後に機器発熱量としては、電燈のみであるから、

$$Q_3 = 0.01 (\text{kW}) \times 2 \text{ 個} \times 860 (\text{kcal/kW} \cdot \text{hr}) = 17 (\text{kcal/hr})$$

以上の Q_1 、 Q_2 、 Q_3 を(4)式で計算すると

$$Q_T = 2.621 \text{ kcal/hr}$$

(2) 熱計算結果より見て、計測時点での PTC 内温度は平衡状態ではなく、上昇中であることがわかる。

平衡状態での PTC 内温度 t_{AT} は、貫流熱量 Q

が発熱量 Q_T に等しいとして、

$$Q = Q_T \dots\dots\dots (8)$$

$$Q = K (t_{AT} - t_B) S$$

$$t_{AT} = Q_T / K \cdot S + t_B \dots\dots\dots (9)$$

これを前出の数値を用いて計算すると、

$$t_{AT} = 2.621 / 9.30 \times 13.4 + 11.50 = 32.53 (^\circ\text{C})$$

(3) 現在開発が推進されている 300 m 潜水作業システムにおける PTC ヒーターにつき検討をする。

300 m 相当圧力のヘリウム環境下では、PTC 内部温度 t_A は少なくとも、 30°C とする必要があることがわかっている。潜水シミュレーション実験では最適温度として、 $30 \sim 31^\circ\text{C}^{(5)}$ としている。

一方、外部海水温度 t_B は、上記開発計画では日本近海を考慮して 7°C としている。本装置において、これを実現することを検討する。

$$t_A = 30^\circ\text{C}, t_B = 7^\circ\text{C}$$

貫流熱量は、

$$Q = (t_A - t_B) \cdot K \cdot S$$

$$= (30 - 7) \times 9.30 \times 13.4$$

$$= 2.866 (\text{kcal/hr})$$

一方、PTC 内発熱量 Q_T に関しては、前述より、 $Q_2 = 200 \text{ kcal/hr}$ 、 $Q_3 = 17 \text{ kcal/hr}$ であ

表 4 PTC ヒーター実験計測結果
Results of PTC heater tests

月／日 date	PTC 外 水 温 water temp. of outside the PTC	温 水 温 度 temp. of flot water			温 水 供給量 flow rate of hot water	P T C 内 温 度 temp. of inside the PTC				PTC 内外 温 度 差 temp. difference between inside and outside.
		ヒータ 入 口 inlet	ヒータ 出 口 outlet	出入口 温度差 differ- ence		上 部 upper part	中 部 middle part	下 部 lower part	平 均 ave.	
時 刻 time	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)	($^\circ\text{C}$)
1 / 11										
11:45	11.5	34.0	32.5	1.5	19.5	19.0	18.3	18.0	18.4	6.9
50	11.5	34.0	33.0	1.0	19.5	19.8	19.0	18.5	19.1	7.6
55	11.5	35.0	33.5	1.5	21.5	21.0	19.8	19.2	20.0	8.5
平均値 ave.	11.5									7.67

(注) 環境ガス組成は、つぎのとおりである。

空気 内圧 = $1 \text{ kgf/cm}^2\text{-ab}$

(温水式 PTC ヒータ)

るから、

$$Q_T = \frac{Q_1}{0.85} + Q_2 + Q_3 = Q_1 + 217 \text{ (kcal/hr)}$$

ここに Q_1 はヒーターの発熱量であり、またヒーターのよごれ等の余裕として 0.85 を考えている。以上を(3)式に代入すると、

$$\frac{Q_1}{0.85} + 217 = Q = 2.866$$

$$Q_1 = (2.866 - 217) / 0.85 = 3.116 \text{ (kcal/hr)}$$

ヒーターの発熱量曲線 (図15参照) から見ると、He 環境下で十分実現しうる PTC 内温度といえる。

ただし、この図の条件は 300 m 水深相当とは異なるので、さらに計画を進めるに当っては、この条件についてのヒーターからの熱放射に関する。さらに詳細な資料の蓄積が重要といえる。

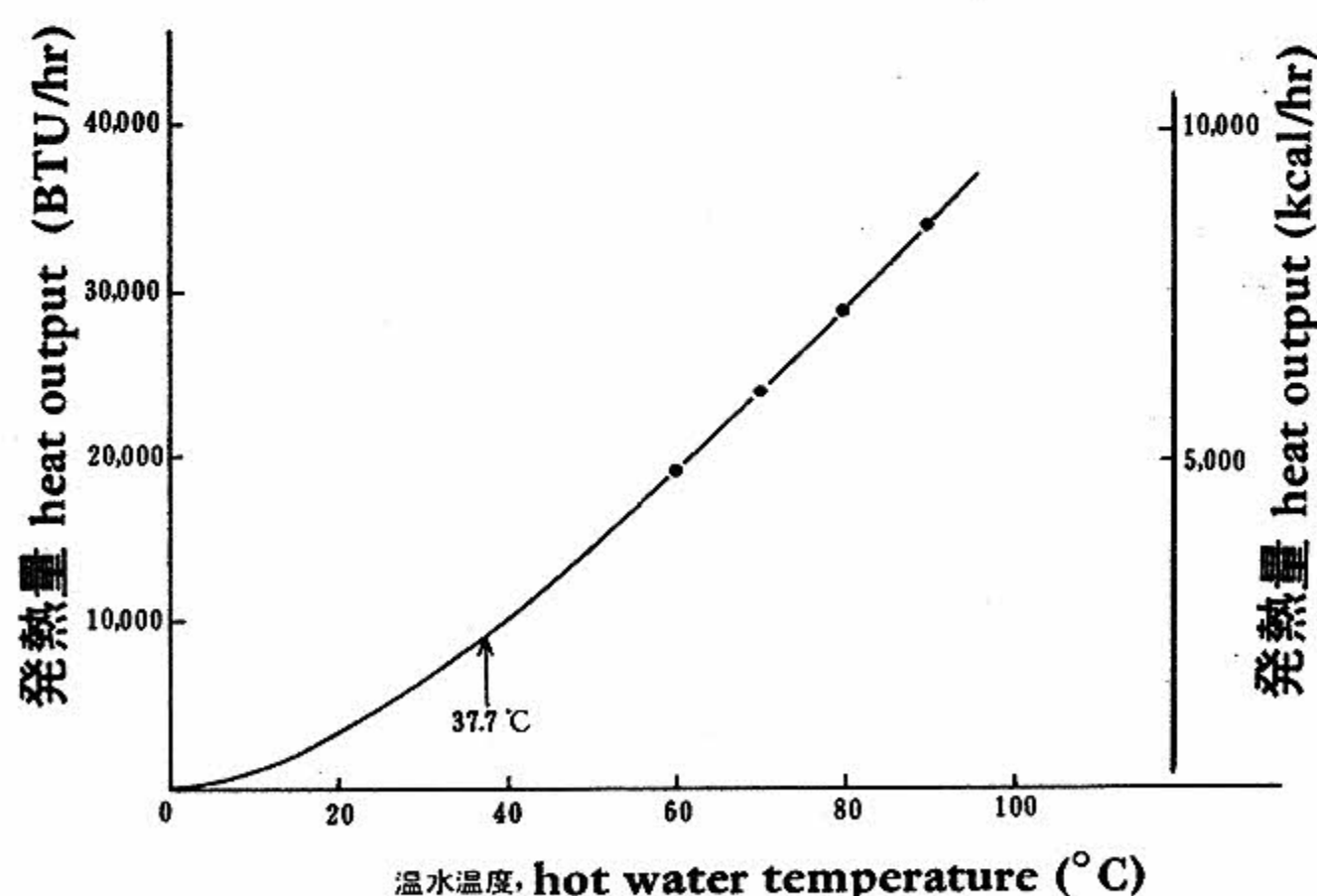
5. PTC 保温材の断熱効果

5.1. 実験方法

PTC からの熱損失を少なくするため、保温材を取付け、PTC の加温および保温効果を高めることは重要である。

高い海水圧に対しても、断熱効果の損われない保温材として、近年、耐圧ガラスマイクロバルーンを樹脂で成型したものが開発されている。

この例として、Eccofloat (Emerson & Cumming 社製) があげられる。これは写真5に示すように真球に近いガラスマイクロバルーンをプ



温水流量, flow rate: 5.4 Gal/min (24.5 ℓ/min)

図14 PTCヒーターの送水温度—発熱量, 曲線

Characteristics of PTC heater (hot water temperature vs heat output)

ラスチックで成型したもので、耐圧性があると共に、中空球のため断熱性にすぐれている。

そこで PTC の外側に Eccofloat 保温材を取付け、昭和53年 (1978年) 1月11日～16日の間、横須賀港で実施した実海域実験で使用し、その断熱効果を計測すると共に、保温材の接着性等を調査した。

5.1.1. PTC 保温材の取付

(1) 保温材仕様

(a) 名称; 保温材—Eccofloat DB-39
接着剤—Eccobond 45 Clear
充填剤—Eccofloat DB-39 Patch Kit

(b) 保温材厚み; 1/2" (12.7 mm)

(c) 保温材比重; 0.72⁶⁾

(d) 保温材熱伝導率; 0.1188 kcal/m hr °C⁶⁾

(e) 保温材収縮率 (厚み); 1.8% at 1500' (457 m) 海水⁶⁾

(2) 保温材取付け

PTC への保温材取付けは、下記手順で行った。

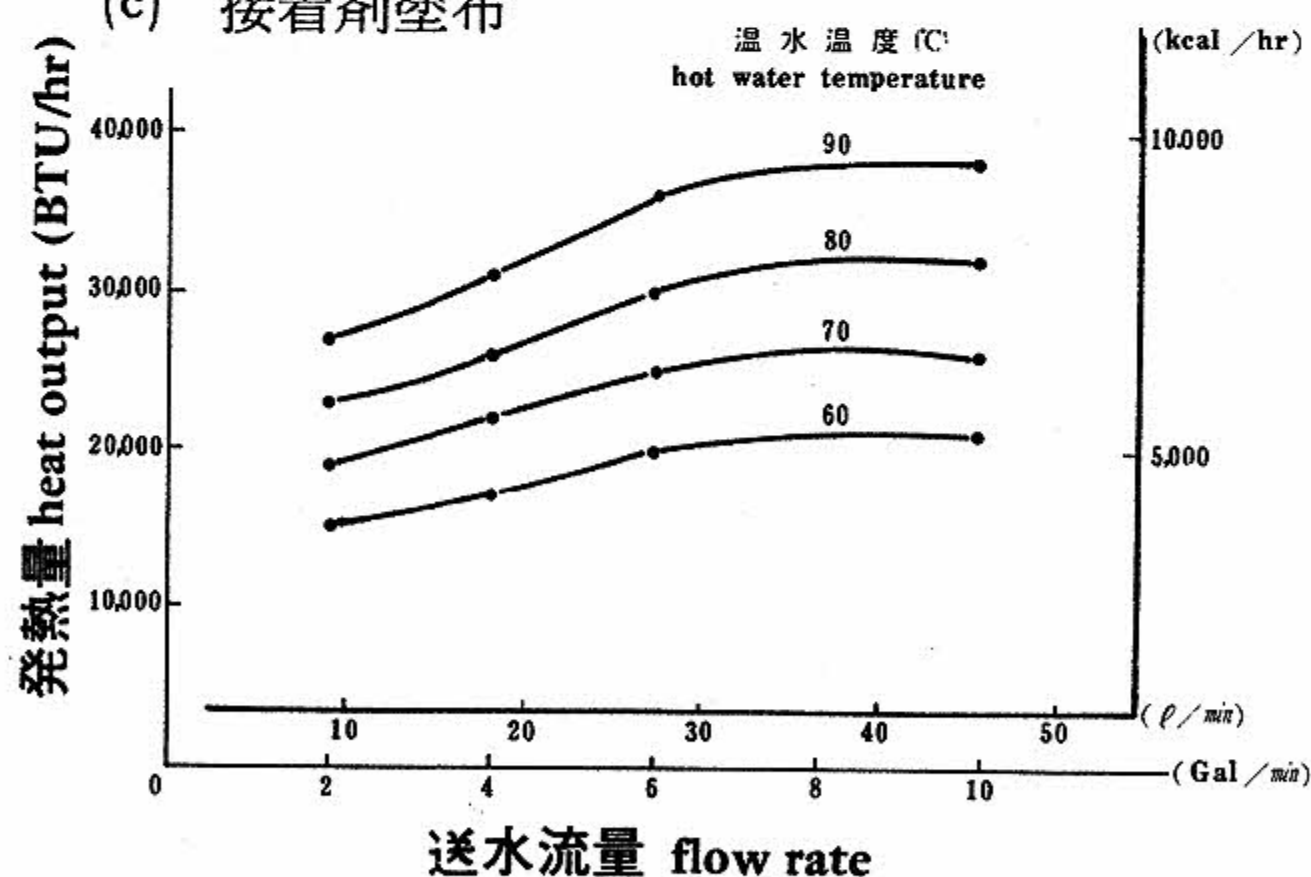
(a) PTCペイント補修

保温材は PTC のペイント塗膜の上に接着することとし、これの準備として、PTC のペイントを完全に補修する。

(b) 接着面の清掃

PTC 表面と保温材表面をアセトンで拭きとり、清掃する。

(c) 接着剤塗布



He 環境, 8 atm., 72°F (22.2°C), at He environment of 8 atm., 72°C

図15 ヒーターの発熱量曲線 (Kinergetics, Inc. 社の資料による)

Characteristic curves of hot water PTC heater (by reference of Kinergetics, Inc.)

接着剤 Eccobond 45 Clear を保温材 Eccofloat の接着面と PTC 外表面塗膜上に塗布する。

(d) 保温材張付け

PTC に保温材をはり付ける。

接着剤硬化時間は温度 18°C 以上で約24時間である。

(e) 継目部の充填

保温材と保温材の継目に充填剤 DB-39 Patch Kit を充填する。この作業は保温材が完全に接着したのちに行った。

(f) 仕上げ塗装

接着剤および充填剤が硬化したのち、仕上げペイントを塗布する。

5.1.2. PTC 保温材断熱効果実験方法

水深 60m の海中で、PTC 内部を大気圧状態にし、PTC 内ベルヒーターに温水を供給して実験を行った。所定の海中深度に到達したのち、センサーを取付けて温度および熱流が静定(約 10min)してから計測を行った。なお、計器のキャリブレーションは各計測ごとに行った。

(1) 計測項目

T_1 ; 海水温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t_w ; PTC 内壁面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 ; PTC 内部温度 ($^{\circ}\text{C}$)

Q ; 熱流束 ($\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr}$)

その他、温水入口温度、温水供給温度、送水量、潮流速。

(2) 計測要領

PTC 内部のあらかじめ指定された4箇所にセンサーを取付けて計測した(図17参照)。

T_1 , T_2 ; PTC 内部に取付けられたダイアル式温度計による。

Q : 熱流束計 (HFM-MU 型, 昭和電工製) による。

t_w ; サーミスター温度計による。

5.2. PTC 保温材断熱効果の計測結果および解析

5.2.1 計測結果

各計器は良好に作動し、ほぼ所期の計測を行うことができた。計測結果を表5に示す。

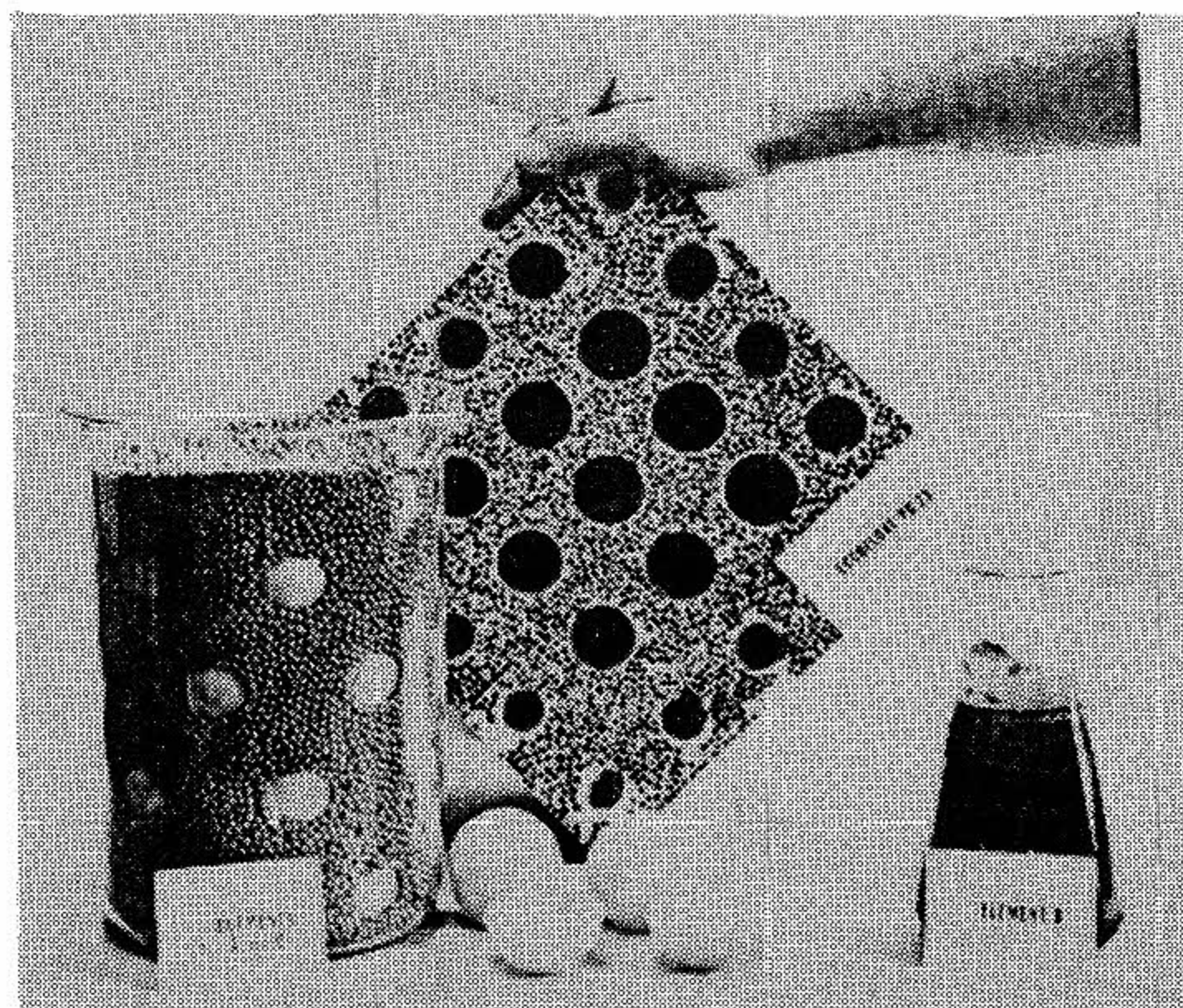


写真5 エコフロートおよびガラスマイクロパール
Eccofloat & glass microballoons

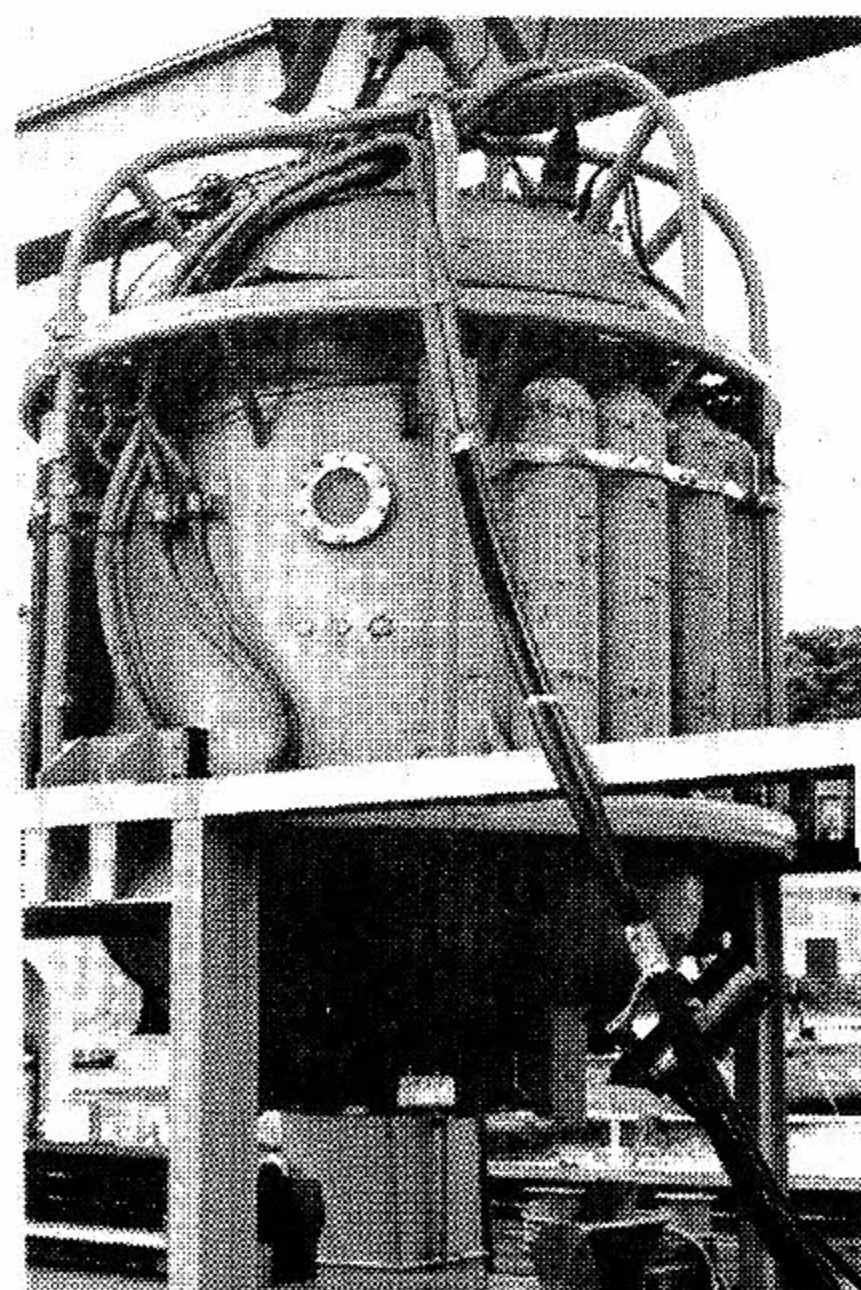


写真6 外表面に保温材を取付けた PTC
PTC fitted with heat insulator (Eccofloat)

計測結果からみて、PTC内部温度は、まだ上昇過程にあり、十分静定した状態ではないが、計測時間等の制限もあり、やむを得ないものといえる。

5.2.2. PTC保温材熱通過率（K値）の計算
断熱効果の評価は熱通過率（K値）をもって行うこととした。そこで実験時の条件下におけるK値の計算を行った。計算はPTC外板のみの場合とPTC外板に保温材（Eccofloat）を取付けた場合の二通りについて行う（図18参照）。

T_1 （℃）；海水温度

T_2 （℃）；PTC内部温度（大気圧空気）

tw （℃）；PTC内壁面温度

α_1 （kcal/ m^2 hr℃）；PTC外面の熱伝達率

α_2 （kcal/ m^2 hr℃）；PTC内面の熱伝達率

λ_n （kcal/ m hr℃）；各層の熱伝導率

δ_n （m）；各層の厚み

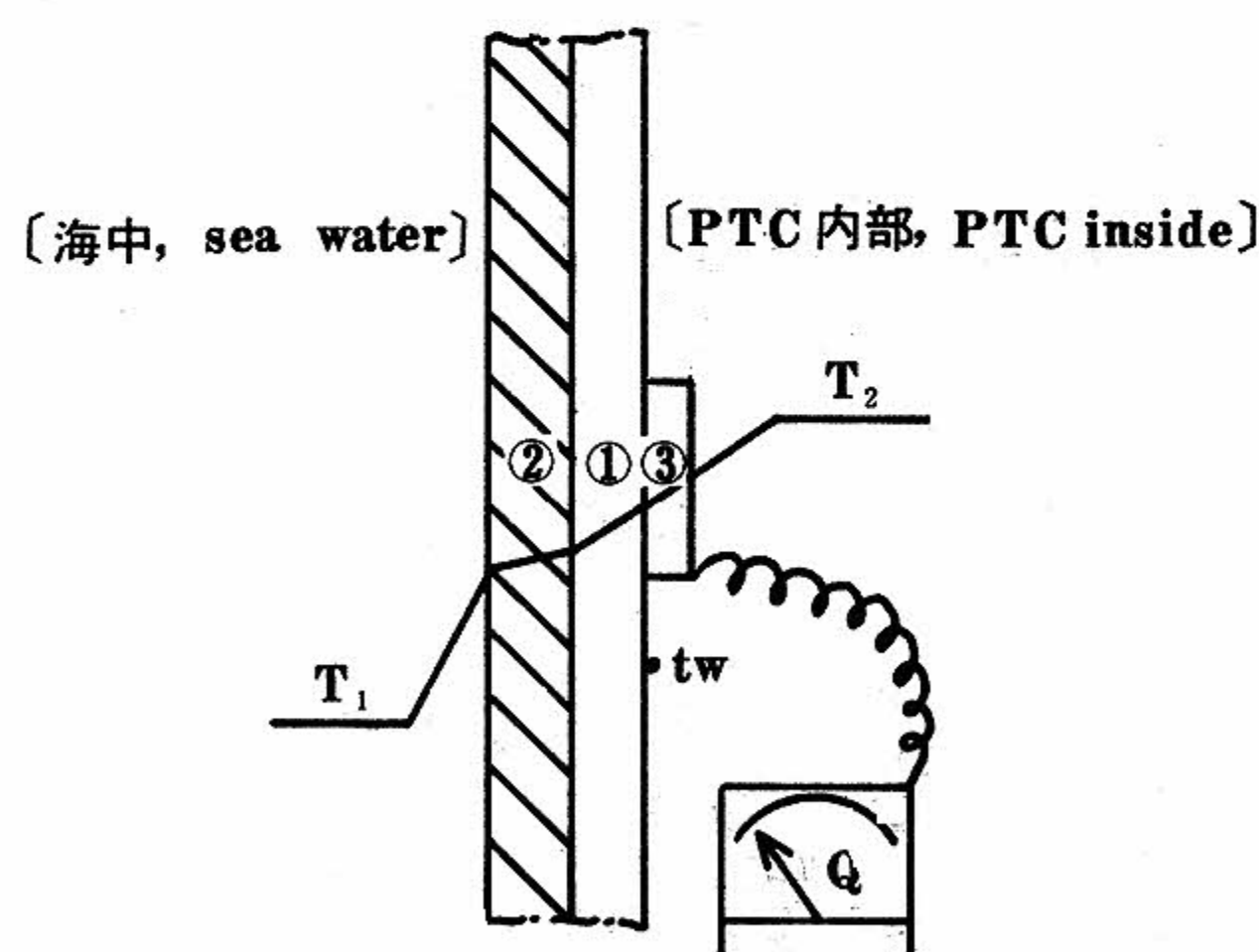
V_1 （m/s）；海水の流速

V_2 （m/s）；PTC内空気の流速

K （kcal/ m^2 hr℃）；熱通過率

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{n=1}^k \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}$$

実験時の計測点（A点）は図19のような状態にあったとして計算を行い、熱通過率（K値）を各



1. PTC 外板, hull plating of PTC (SM41材)
2. 保温材, heat insulator (Eccofloat)
3. センサー, sensor

図16 保温材性能試験計測装置
Insulator capability measuring system

ケースについて求める。

$\lambda_1 = 46 \text{ kcal}/m \text{ hr } ^\circ\text{C}$ （PTC外板の鋼板の熱伝導率）

$\lambda_2 = 0.1188 \text{ kcal}/m \text{ hr } ^\circ\text{C}$ （保温材の熱伝導率）

$\delta_1 = 0.022 \text{ m}$ （PTC外板の厚さ）

$\delta_2 = 0.0127 \text{ m}$ （保温材の厚さ）

$V_2 = 5 \text{ m/s}$ （PTC内の空気の流速、ベルヒーターやCO₂スクラバーファンの駆動状態）

(1) 計測No.1についての計算

$T_1 = 13.2^\circ\text{C}$, $T_2 = 19.6^\circ\text{C}$, $tw = 20.0^\circ\text{C}$,

$V_1 = 0.03 \text{ m/s}$, $d = 1.75/2 = 0.875 \text{ m}$

(a) α_1 の計算

レイノルズ数； $Re = \frac{V_1 d}{\nu_1} = 2.17 \times 10^4$ （ ν_1 ：動粘性係数 m^2/S ）

プラントル数； $Pr = \frac{\nu_1}{a_1} = 8.63$ （ a ：温度伝導率 m^2/hr ）

ヌーセルト数； $Nu = \frac{0.0296 Re^{0.8} Pr}{1 + B Re^{-0.1} (Pr - 1)}$
（強制対流の乱流熱伝達）

ここに、

$$B = 0.860 \left\{ 1 + \ln \left\{ \frac{(1 + 5Pr)/6}{(Pr - 1)} \right\} \right\} = 1.08$$

故に $Nu = 186.43$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 \cdot Nu}{d} = 108.45 \text{ (kcal}/m^2 \text{ h } ^\circ\text{C})$$

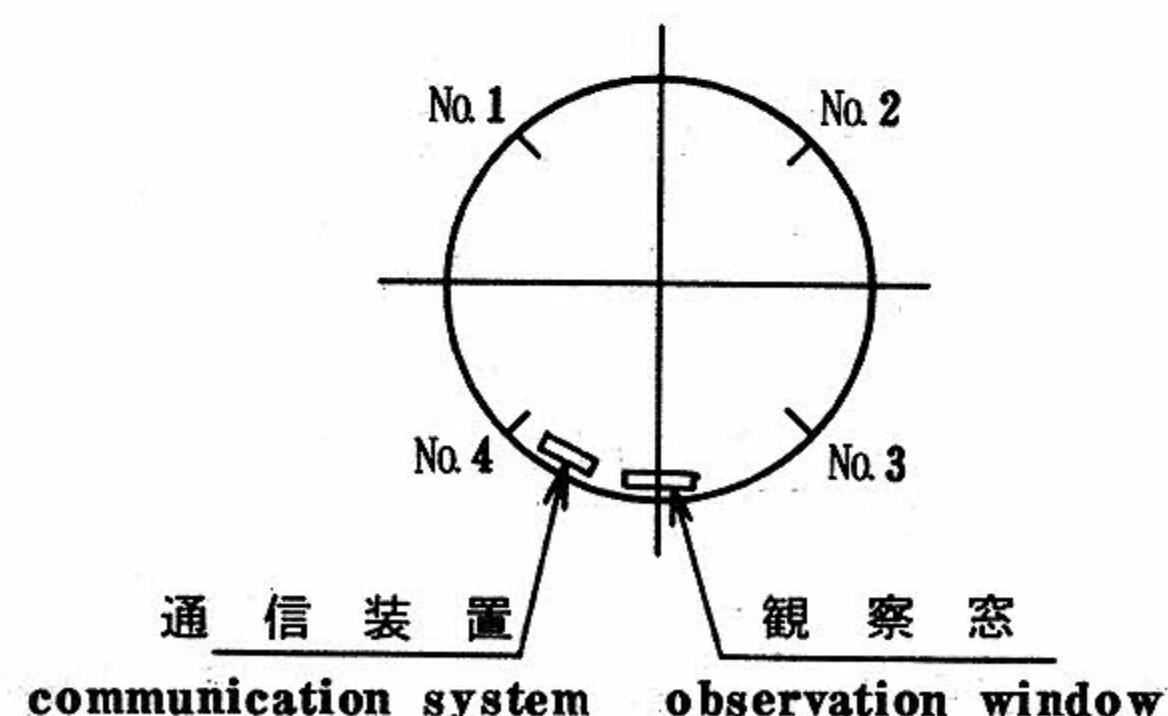


図17 保温材性能試験計測位置配置図
（PTC平面図）

Arrangement of insulator capability measuring position (plan of PTC)

(b) α_2 の計算

温度条件としては、 T_2 と t_w の中間温度 (t_m) として同様に求める。

$$t_m = 19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Re = \frac{V_2 d}{\nu_2} = 2.80 \times 10^5$$

$$Pr = \frac{\nu_2}{a_2} = 0.713$$

$$B = 1.679$$

$$Nu = 557.6$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2 Nu}{d} = 14.08\text{ (kcal/m}^2\text{ hr }^{\circ}\text{C)}$$

(c) δ_n / λ_n の計算

$$\text{PTC 外板 } \delta_1 / \lambda_1 = 4.78 \times 10^{-4}$$

$$\text{保温材 } \delta_2 / \lambda_2 = 1.069 \times 10^{-1}$$

(d) K 値の計算

保温材のない場合 (K_1) ;

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$K_1 = 12.39\text{ (kcal/m}^2\text{ hr }^{\circ}\text{C)}$$

保温材取付けの場合 (K_2)

$$\frac{1}{K_2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$K_2 = 5.33\text{ (kcal/m}^2\text{ hr }^{\circ}\text{C)}$$

(2) No. 2 ~ No. 4

No.1 と同様な計算を No.2 ~ No.4 についても行った。実験計測値と計算値との比較を表 6 に示す。

5.3. PTC 保温材断熱効果実測実験の考察

(1) 保温材を取付けることによって、PTC 内部温度を外海水よりも $7 \sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高く維持することができた。また供給温水温度と送水量によっては $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上の温度保持が可能であった。

(2) 計測値については、計測時間の経過と共に計算値に近づいており、これは熱流が一定し、温度状態が定常になるまで、かなりの時間が必要であったことを表わしている。しかし、潜水時間の制限で、PTC 内での計測時間が十分とれず、計測値にバラツキが生じた。

(3) 熱通過率 (K 値) は全体的に計測値の方が計算値よりも大きくなっている (表 6 参照)。これは保温材と PTC との間への浸水や付属品取付用のサポート等防熱困難な部分からの逃熱の影響もあると考えられる。

(4) 保温材の取付け状態

取付け状態は全体的には、まずまず良好であった。本保温材は海水圧にも十分耐え得るし、PTC



写真 7 熱流束計 (HFM-MU)
Heat flux meter

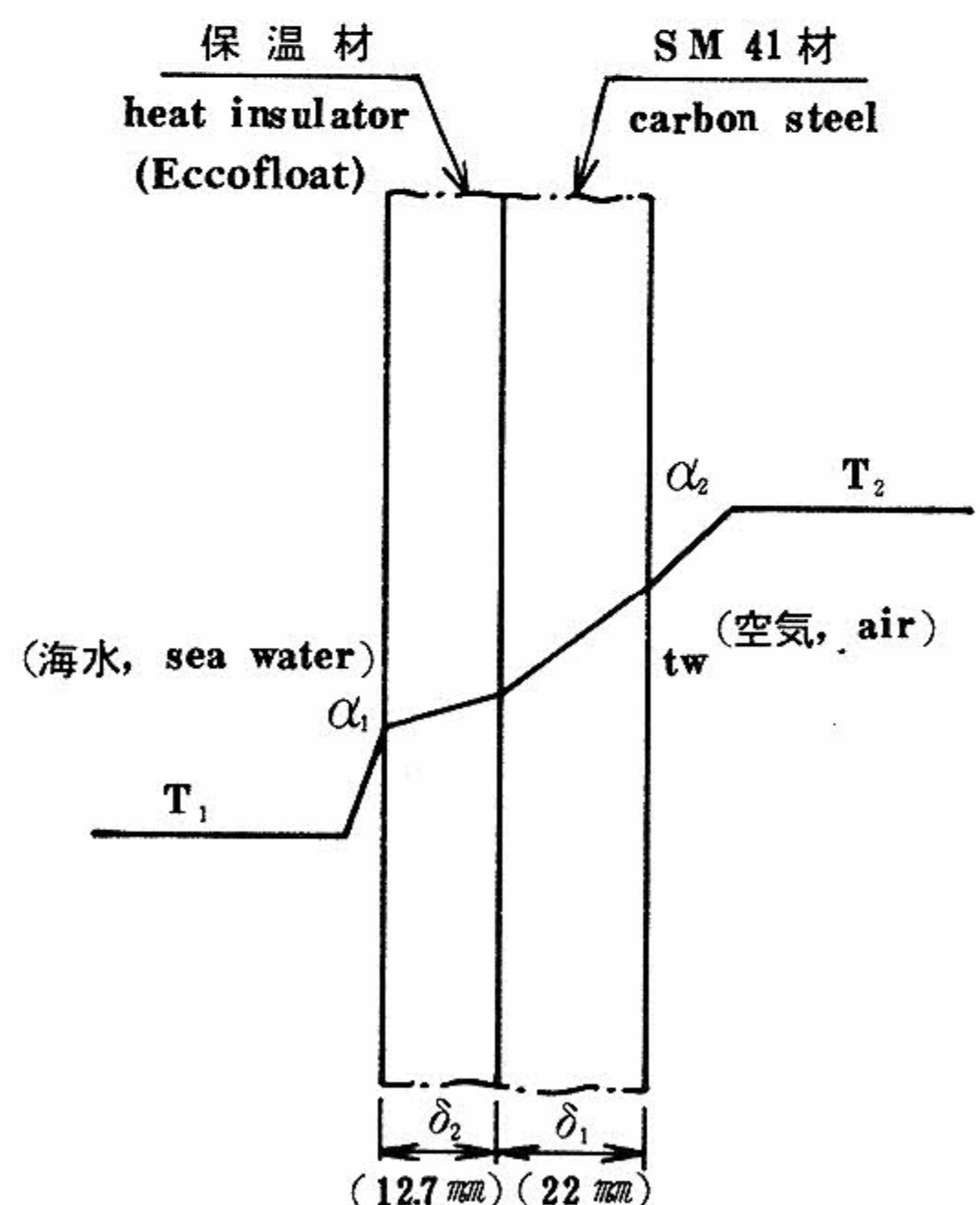


図 18 PTC 保温材の熱通過層
Heat transfer layers of PTC heat insulator

表5 PTC保温材実験計測結果
Results of PTC heat insulator

計測項目 items	水深 depth, 53m				備考 remarks
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
時刻 time	14:45	14:51	14:57	15:03	
海水温度 sea water temp. [T ₁] (°C)	13.2	13.2	13.2	13.2	* 14.2
PTC内部温度 PTC inside temp. [T ₂] (°C)	19.6	20.1	20.6	21.0	* 支援ブイ上で別途計測した。
PTC内壁温 PTC hull inside temp. [t _w] (°C)	20.0	18.1	17.8	18.0	
熱流束 heat flux [Q] (kcal/m ² /hr)	56	92	61	54	
温水PTC入口温度 hot water temp. at PTC inlet (°C)	47.0	48.5	49.0	49.2	
温水供給温度 (船上) hot water temp. at heater delivery (°C)	50.8	51.8	52.0	52.1	
送水量 hot water flow rate (ℓ/min)	22.0	22.0	22.0	22.0	
潮流速 current velocity	0.03 m/s, 25°				
K 値 K-value (kcal/m ² hr °C)	8.8	13.3	8.2	6.9	$K = \frac{Q}{T_2 - T_1}$

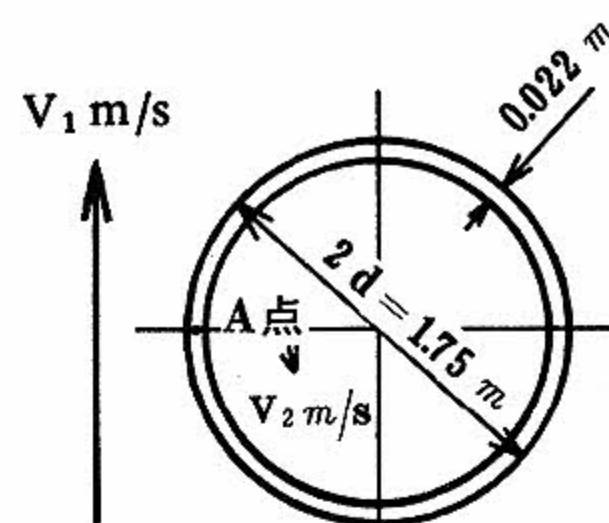


図 19 PTC 付近の流れ
Flow state around PTC

表 6 K 値, 計算値と計測値の比較
Comparing measured K-value with calculated values

K 値 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$)

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
実験計測値 (保温材取付) [K]		8.8	13.3	8.2	6.9
計算値	保温材取付 [K_2]	5.33	5.33	5.33	5.33
	保温材なし [K_1]	12.39	12.37	12.37	12.39

の上昇および下降による外力の繰返しに対して十分耐えることができた。しかし、PTCの下部は保温材がはがれやすく、一部海水が浸入し、保温材とPTC外板との間に空間が生じていた。この部分は上向き作業で、施工困難であることも考え合わせ、接着剤硬化までの間、下部からのサポートを確実に行うと共に、接着剤の流失を防ぐ等の工夫が必要といえる。

また保温材の継目部から一部海水が浸入していた。これは狭い継目部に充填剤が十分入っていなかったためと判断される。このことから継目部は、むしろ、ある程度大きくとって充填剤で確実に埋め合わせる方が良い結果が得られると考えられる。

6. ま と め

深々度の潜水作業に不可欠なダイバー加温システムとして、温水加温服、温水式PTCヒーターおよびPTC保温材につき、総合的な運用実験を行った。温水加温服システムを潜水シミュレーターに組込んで水深300m、水温5℃までの深々度、

低温下での実用実験を行うとともに、シートピア装置のPTCに温水式PTCヒーター、PTC保温材をとりつけ、温水式加温服システムと組合わせて水深60mでの冬期実海域実験を行って性能作動を確認して効果が顕著であることを知るとともに、つぎの知見を得た。

- (1) 温水式加温服 (DUI社製 Indust suit および Non-Return Suit) は速効性にすぐれ、温水供給開始後1~2minには所定の温度に達し、かつ服内温度分布も均一であり、33~38℃の範囲内である。
- (2) 温水供給が停止した場合の服内温度降下はかなり速く、使用中の温度から5℃降下までの時間は、Non-Return Suitで約6minである。
- (3) 温水供給ポンプの所要吐出圧力は、主としてホースの流体抵抗による圧力損失であり、これについては通例の流体抵抗計算式、例えばダルシー・ワイスバッハ式にブラジウスの管摩擦係数式を適用したものと、実測値とはほぼ良く一致する。
- (4) ホースによる熱損失については熱平衡から次

の式を求め実測値と比較して良く合致することを確かめた。

$$\frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} = e^{-\frac{367.9 \pi \lambda L}{Q \cdot C \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}}$$

ここに、 t_1 = 入口温水温度 ($^{\circ}\text{C}$) (=供給ポンプ出口温度)

t_2 = 外海水温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t_3 = 出口温水温度 ($^{\circ}\text{C}$) (=加温服入口温度)

Q = 温水流量 (ℓ/min)

C = 海水比熱 (= 1 kcal/kg)

d_1 = ホース内径 (mm)

d_2 = ホース外径 (mm)

λ = ホース材質熱伝導率 (= $2.976 \times 10^{-3} \text{ kcal/m} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

L = ホース長さ (m)

(5) PTC温水ヒーターは良好に作動し、加温効果が顕著で実海域実験において約 2.400 kcal/hr の発熱量を得、外海水温度約 12°C に対し PTC 内部は約 20°C であり、まだ上昇中であつた。このデータおよび(6)項で得た熱通過率 (K 値) などにもとづき、平衡状態の PTC 内部温度を換算すると約 32.5°C となる。

(6) 前記で得られた資料をもとに、現在開発が進められている潜水作業システムの条件、水深 300 m 、水温 7°C に対して、PTC 内温度を 30°C に保持するためのヒーターの容量を試算すると約 3.100 kcal/hr となる。

(7) PTC にとりつけた耐圧ガラスマイクロバルーン樹脂成型の保温材は、実海域の使用に十分耐え得る。ただし、はりつけ作業の良否の影響が大きく、PTC 下部のものは作業条件が悪いこともあり、間隙ができて海水浸入が見られたので、工作要領については、さらに改良の余地がある。

(8) PTC 保温材による保温効果を PTC 壁面の熱通過率 K で表現したものは計算値の $5.5 \sim 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ に対し、実測値 $6.9 \sim 13.3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ であつた。

これには前記間隙への海水浸入の影響などが原因になっていると考えられる。

以上のようにダイバー加温システムについて加温服などの個人装備品から PTC ヒーターや保温材などのより大規模な装置に至るまでを総合的に組合せ、潜水シミュレーション実験や実海域実験において実用実験を行い、実際の運用という制約の中で、できる限りフィールドデータを集め、これを解析して運用資料、設計資料を得た。しかし、本研究成果はまだデータの収集と解析の手法などにつき、その端緒をつかんだ段階と言わねばならず、資料の中には計算値と計測値の合致がまた不十分なものもあり、また実海域実験については、計測の周囲条件の種類はまだまだ少ない。

現在、開発が進められている 300 m 潜水作業システムのダイバー加温の基礎データとするためには、さらに多種の条件に対し、この実験を蓄積せねばならない。特に種々の圧力における高圧ヘリウム環境における PTC ヒーターの熱放射現象や、PTC 保温材の断熱効果などの伝熱工学の面でのさらに体系的なデータの収集と解析が必要といえる。

文 献

- 1) Department of the Navy "U.S. Navy Diving Manual" (1975)
- 2) 海洋資料センター, "海洋環境図" (1975), p. 19, 日本水路協会
- 3) Walter Penzias, M.W. Goodman, "Man beneath the Sea" (1973), p. 614, John Wiley & Sons, Inc.
- 4) 斉藤一, 三浦豊彦, "日本の高温労働" (1963), 労働科学研究所出版部
- 5) "昭和53年度 大陸棚有人潜水作業技術の研究開発" (1979), 海洋科学技術センター
- 6) Preliminary Technical Bulletin 40-7C ECCOFLOAT DB-39, Emerson & Cuming, Inc.
- 7) 日本機械学会編 "伝熱工学資料" 改訂第3版 (1975), 日本機械学会