深海潜水調査船耐圧殻用高靱性高張力鋼の 溶接に関する研究 (第 1 報)*

木原 博** 佐藤邦彦*** 遠藤倫正**** 広瀬 衛**** 下山仁一***** 高野元太*****

Study on Welding of High Strength Steel with High Toughness for Pressure Hull of Deep Submergence Vehicle (1st Report)*

by Hiroshi Kihara**, Kunihiko Satoh***, Michimasa Endoh****

Mamoru Hirose*****, Toshikazu Shimoyama*****, Genta Takano*****

For pressure hulls of Deep Submergence Vehicle (DSV) operating in seas of 2000 m depth, the most important point is the maximum load carrying capacity under the minimum weight. For this reason, spherical shell made of high strength steel is adopted for pressure hulls. Spherical shape is an optimum shape for external hydrostatic pressure loading and the most suitable steel for this shape is HT100 steel (5 Ni-Cr-Mo-V quenched and tempered steel with a yield strength of 90 kgf/mm²).

However, in the application of HT100 steel to spherical pressure hulls, there are some difficult problems from the view point of fabrication; that is, (1) quenching and tempering procedure of hemisphere. (2) welding procedure of two hemispheres and penetrate joints. Then heat treatment conditions and TIG welding conditions were investigated.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The quenching cooling rate of HT100 is needed over 3°C/sec for satisfying required property.
- (2) The mean quenching cooling rates of hemisphere (thickness: 60 mm, diameter 2320 mm) are 5.7~6.2°C/sec. Then it is possible to fabricate hemisphere by hot forming method.
- (3) It is necessary to preheat over 100°C for preventing cold crack.
- (4) The cooling rate (at 540°C) of weld metal is required over 20.5°C/sec for guarantee 90 kgf/mm² proof stress.

1. 緒 言

我が国は陸上資源に乏しいため、四方を海に囲まれた利点を生かして海洋の資源開発、海洋空間の利用を積極的に図る必要がある。そのためには有人深海潜水調査船による深海の海洋調査が重要となる。

深海潜水調査船の耐圧殻は、外水圧に対する強度を確保すると同時に、機動性を高めるためにできるだけ軽量の構造でなければならない。この要求を満足させるために、高靱性高張力鋼を使用して構造効率の高い球形殻として精密な加工精度で製作する必要がある。

現在我が国で建造中の 2000 m 深海潜水調査船では耐圧球殻に 0.2%耐力が 90 kgf/mm² 以上の高靱性高張力鋼が使用されるが、このような高強度材料の溶接においては遅れ割れ防止ならびに溶接継手性能の確保が問題となる。

また耐圧球殻の製作方法は球面を幾つかに分割したセグメントを冷間加工により成形し、これらを溶接により接合して球形とする方法(冷間曲げ加工法)と、熱間加工により成形された 2 個の半球殻を溶接により接合して球形とする方法(熱間曲げ加工法)とに大別される。

熱間曲げ加工法は、半球殻を一体成形するために溶接継手が少なく、や金的に均一な材質が得られること、強度不連続部が減少できること、および高い加工精度により歩留まりが向上できることなどの長所があり、大深度の潜水船の耐圧球殻にはより適した製作法である。しかし、我が国では高張力鋼を使用した潜水船の耐圧球殻は、従来から冷間曲げ加工法によって製作されてきた。

著者らは 2000 m 深海潜水調査船の耐圧球殻を熱間加

*原稿受付 昭和55年 9 月 5 日

**名 誉 員 東京大学・大阪大学名誉教授 Honorary Member, Emeritus Professor, University of Tokyo and Osaka University

***正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

****正 員 三菱重工業(株)神戸造船所 Member, Kobe Shipyard, Mitsubishi Heavy Industry Ltd.

*****正 員 三菱重工業(株)高砂研究所 Member, Takasago Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industry Ltd.

Fig. 1 Test program of full scale model of the pressure hull

Table 1 Chemical compositions

Materials	Chemical compositions (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
HT 100	0.08	0.30	0.46	0.003	0.005	0.05	5.12	0.57	0.53	0.05	0.040
Filler wire ($\phi 1.6$)	0.09	0.37	1.92	0.003	0.002	0.21	2.64	1.15	0.66	-	-

工法で製作するにあたり, 0.2% 耐力が 90 kgf/mm^2 級の高靱性高張力鋼の調質熱処理施工法と TIG 溶接施工法について検討を行ない, 耐圧球殻の実物大モデルを製作して工作法の確立を図った。本報ではこのうち調質熱処理施工法と TIG 溶接施工法について報告する。

2. 研究の内容と供試材料

深海潜水調査船の耐圧殻の実物大の模型を Fig. 1 の手順で製作し, その工作法を確立した。耐圧殻の製作に当って, 耐圧殻の品質を決定する重要な技術は次の2点である。

- (1) 半球製作法 (熱間成形, 熱処理)
- (2) 溶接法 (赤道溶接法, 貫通金物はめ込み溶接法)

上記のうち, 耐圧殻の品質を保証するためには, 耐圧殻母材の品質上から, 熱処理技術が, また耐圧殻の継手の品質上から, 溶接技術が最も重要である。

熱処理技術の確立に当っては, 2000 m 深海潜水調査船の耐圧殻に使用する鋼板が調質鋼であるため, 熱間成形加工の後に焼入れ焼もどしの熱処理を行う必要がある。この焼入れ焼もどしの最適条件をは握するため, 実

物大模型の半球熱処理の施工に先立って小形試験材による熱処理条件シミュレーション試験を実施した。

溶接技術の確立に当っては, その溶接の最適条件をは握するため, 平板試験による溶接性試験を実施した。実物大模型の溶接には, シーケンス制御の可能な高精度大容量 TIG 溶接装置及び高精度回転装置を使用した。

供試鋼材は, 2000 m 潜水調査船に使用される0.2%耐力 90 kgf/mm^2 級の鋼板 HT 100 (板厚 60 mm) を使用した。鋼材の化学成分は 5% Ni-Cr-Mo-V 系で, 焼入れ焼もどしの熱処理により, この強度レベルと優れたじん性値とを確保している。溶接には, 母材と同等の強度及びじん性値を有する TIG 溶接用ワイヤ (線径 1.6 mm) を使用した。これら供試材料の化学成分を Table 1 に示す。

3. 成形加工試験

板厚 60 mm の HT 100 をプレス方式により熱間成形加工を行い, 半球製作した。

3.1 熱間成形加工要領

- (1) 加熱条件

Note 1) Desired shape after hot forming

(1) Radius

$$R_i = 1160 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } R_i \leq 1175 \text{ mm}$$

$$\text{Min. } R_o \geq 1210 \text{ mm}$$

(2) Plate thickness

$$\text{Min. } T \geq 55 \text{ mm}$$

2) Desired shape after machining

(1) Radius R' 1175 mm

(2) Plate thickness t' 35 mm

Fig. 2 Desired shape of hemisphere after hot forming and machining

加熱炉 ふんい気温度制御式重油加熱炉

昇温速度 $220 \times 25 / 60 = 91.7^\circ\text{C/h}$ 以下

加熱温度 $925 \pm 25^\circ\text{C}$

保持時間 1 h 以上

(2) 加工条件

プレス 6000 t 水圧プレス

加工温度 600°C 以上

加工回数 3回(荒押し, 中間修正押し, 仕上押し)

3.2 プレス成形後の形状

熱間成形加工後, 半球殻上の 137 点について, 内面半径, 外面半径及び板厚を測定した。内面半径については最大値は 1165.5 mm, 外面半径については最小値は 1214.0 mm であり, Fig. 2 に示す目標値を満足する精度が得られた。また, 板厚については超音波厚み計による測定の結果, 増減量が $-4.5 \sim +11 \text{ mm}$, 最小板厚は 57.5 mm であり目標値を満足した。更に, 表面をディスクレーシング処理した後, 磁粉探傷により表面検査を行ったが, 割れその他の有害な欠陥は認められなかった。

4. 熱処理試験

本供試鋼材は 2 回焼入れ・焼もどしの調質熱処理により強度じん性を確保するものである。したがって, 熱間成形加工法によって耐圧球殻を製作する場合には, 成形

Fig. 3 Effect of quenching cooling rate and tempering temperature on mechanical properties

された半球殻の状態での調質熱処理を行い, 所定の性能を確保する必要がある。この半球殻の熱処理条件を決定するため, 調質熱処理条件と機械的性質の関係を調べた。

4.1 熱処理条件と機械的性質

熱処理条件の検討には, 主として熱サイクル再現装置を使用した。冷却速度の遅い範囲 (1.5°C/sec 以下) については, 冷却速度可変電気炉を使用した。熱サイクル再現装置における熱サイクル付加試験片寸法は, 引張試験用は $\phi 18 \times 100 \text{ mm}$, 衝撃試験用は $12 \times 80 \text{ mm}$ とし, 冷却速度可変電気炉における試験板寸法は $20 \times 200 \times 260 \text{ mm}$ とした。また, 引張試験には JIS Z 2201 4号試験片 ($D=8 \text{ mm}$, $GL=28 \text{ mm}$) を, 衝撃試験には JIS Z 2202 4号試験片を使用した。なお, 付加熱サイクルは, 所定の焼入れ焼もどし温度に保持した後, 実施工における作業時間中の温度降下を考慮した温度から冷却を開始した。

4.1.1 焼入れ冷却速度及び焼もどし温度の影響

試験結果を Fig. 3 に示す。0°C におけるシャルピー衝撃吸収エネルギーは, いずれの条件でも $20 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上の良好な値を示し, 一般に低下が見られる冷却速度の遅い範囲でも問題はなかった。

一方, 0.2%耐力には, 焼入れ冷却速度 ($700 \sim 400^\circ\text{C}$ の平均冷却速度) と焼もどし温度の影響が見られ, 冷却

Fig. 4 Effect of tempering cooling rate in tensile properties

速度が遅くなると0.2%耐力は急激に低下した。また、同じ冷却速度においても、焼もどし温度が25°C上昇すると0.2%耐力が約2 kgf/mm²低下した。

Fig. 3 から分るように、625°Cの焼もどし温度で90 kgf/mm²以上の0.2%耐力を得るためには、焼入れ時の冷却速度を3°C/sec以上にする必要があると考えられる。

4.1.2 焼もどし冷却速度の影響

焼もどし冷却速度と引張性質の関係について調べた結果をFig. 4に示すが、焼もどし時の冷却速度(503~200°Cの平均冷却速度)が0.5~10°C/secの範囲において0.2%耐力に対する影響は見られなかった。なお、シャルピー衝撃吸収エネルギーについては、Fig. 3に示すように冷却速度の遅い範囲でも十分高い値が得られていた。

4.2 半球殻の熱処理

HT 100 製半球殻の熱処理に先立ち、同一寸法の軟鋼製半球殻を製作し、半球殻上42点で冷却速度を調べた。その結果、炉出し後速やかにかくはん装置付の水そうで冷却することにより、半球殻全面において、目標値3°C/sec以上の冷却速度が得られることが確認された。

HT 100 製半球殻の調質熱処理においては、調質熱処理条件は4.1の結果を基に温度のばらつきを考慮して焼入れはやや高めを、焼もどしはやや低めをねらい、1回目の焼入れ温度を870°C、2回目の焼入れ温度を800°C、焼もどし温度を580°Cとし、保持時間をそれぞれ1hとした。また、温度計は軟鋼半球の実績を踏まえ半球殻上25点で行った。測定は板厚中央部(深さ30 mm)及び板

Table 2 Results of heat treatment of HT 100 semisphere

Material	Temperature of heat treatment	Location and number of measuring point	Keeping temperature (°C)	Temperature just before WQ (°C)	Temperature drop (°C)	Average cooling rate ⁽²⁾ (°C/sec)
HT 100	870	1/2 T 16 pcs.	869 ⁽¹⁾ (858, 878)	813 (790, 825)	56 (43, 75)	5.7 $\sigma=1.2$ (4.1, 8.3)
		1/4 T 3 pcs.	868 (863, 870)	798 (790, 810)	69 (60, 75)	5.8 (5.1, 6.5)
		3/4 T 4 pcs.	863 (860, 868)	809 (800, 820)	55 (40, 65)	5.4 (4.3, 7.3)
		Test plate 2 pcs.	862 (860, 863)	800 (800, 800)	62 (60, 63)	5.2 (5.1, 5.3)
		1/2 T 15 pcs.	806 (800, 815)	756 (725, 765)	48 (40, 75)	6.2 $\sigma=1.3$ (4.3, 8.8)
		1/4 T 3 pcs.	804 (800, 808)	742 (735, 745)	63 (60, 65)	7.4 (6.0, 9.4)
	800	3/4 T 4 pcs.	801 (795, 808)	752 (740, 763)	49 (37, 60)	6.0 (4.5, 9.1)
		Test plate 2 pcs.	793 (790, 795)	740 (735, 745)	53 (50, 55)	4.8 (4.8, 4.8)
		1/2 T 15 pcs.	586 (580, 590)	562 (553, 568)	24 (12, 30)	4.7 $\sigma=0.7$ (3.7, 6.0)
		1/4 T 2 pcs.	579 (578, 580)	554 (553, 555)	25 (25, 25)	5.4 (4.9, 5.8)
		3/4 T 4 pcs.	583 (580, 585)	561 (555, 570)	21 (15, 25)	4.6 (3.8, 6.5)
		Test plate 2 pcs.	585 (585, 585)	567 (555, 558)	29 (27, 30)	4.0 (3.6, 4.3)

Note: (1) Upper; average

Lower; (min, max)

(2) 870°C and 800°C; 700~400°C

580°C; 550~200°C

厚の1/4と3/4の深さについて行った。なお、半球殻には実施工の熱処理を想定して、2枚の確性試験板を取付けた。

調質熱処理時の炉内保持温度、炉出し後冷却開始までの低下温度、平均冷却速度などの測定結果をTable 2に示す。

4.2.1 炉内保持温度

半球殻と確性試験板の保持温度は、第1回焼入れ(Q_1)時は858~878°C、第2回焼入れ(Q_2)時は790~815°C、焼もどし(T)時は578~590°Cであり、加熱保持温度分布状況はほぼ均一で目標許容範囲内(目標値 ± 15 °Cの精度)に保てることが確認できた。

いずれの熱処理においても板厚深さ位置による温度差、及び半球殻と確性試験とにおける温度差もほとんど見られず、実施工では確性試験板による温度管理を行えば半球殻の温度は、は握できることが確認された。

4.2.2 冷却速度

板厚中央における半球殻の平均冷却速度(焼入れは700~400°C、焼もどしは550~200°C)は、 Q_1 (870°C)で5.7°C/sec($\sigma=1.2$ °C/sec), Q_2 (800°C)で6.2°C/sec($\sigma=1.3$ °C/sec), T (580°C)で4.8°C/sec($\sigma=0.7$ °C/sec)であった。Fig. 5に各熱処理時における板厚中央、板厚の1/4及び3/4の位置と確性試験板との冷却速度の比較を示す。

いずれの熱処理時においても板厚中央部、板厚の1/4、3/4の位置における冷却速度はほぼ同じであり、確性試験板の冷却速度も半球殻の冷却速度はほとんど同じで

Fig. 5 Temperature distribution at heat treatment

あった。

得られた測定値から焼入れ時の熱伝達係数を推定すると約 3700 kcal/m²・h・°C となり、従来の水冷却の実験値の範囲 1000~10000 kcal/m²・h・°C の中間に近い値であった。

今回の施工法により、目標の 3°C/sec 以上の冷却速度が得られることが明らかになった。

4.2.3 形状計測

調質熱処理完了後、半球殻上 137 点の内面半径及び板厚を測定した。内面半径は 1153.0~1171.0 mm、外面半径は 1211.0~1241.5 mm の範囲であり、目標精度 (内面半径 1175 mm 以下、外面半径 1210 mm 以上) を満足する値であった。調質熱処理による半球殻の形状変化は、適切なひずみ防止対策を行うことにより比較的少なくなると考えられる。機械切削加工後の採取可能板厚は 40 mm となり、目標値 (35 mm 以上) を満足することが確認された。

5. 溶接試験

耐圧殻に用いられた HT 100 は 5 Ni-Cr-Mo-V 系の高張力鋼であり、これらの溶接部は硬化性が大きく遅れ

(a) U groove cracking test

(b) Multipass circular-patch cracking test

Fig. 6 Dimensions of cracking test specimens

割れ感受性が高いので、適正な溶接施工管理が必要である。深海潜水調査船の耐圧殻の溶接箇所は、2 個の半球殻を接合する赤道部と貫通金物のはめ込み部である。この溶接部の性能は、耐圧殻の性能に直接影響するものであり、優れた継手性能でなければならない。そこで溶接欠陥が少なく、強度及びじん性の優れた溶接金属が得られ、かつ溶接割れが防止できる TIG 溶接法について検討した。

5.1 溶接施工条件の設定

模型の溶接に先立ち、溶接施工条件を設定するため、溶接割れ試験及び継手性能試験を行った。

5.1.1 溶接割れ試験

耐圧殻に用いる HT 100 の TIG 溶接における割れ防止予熱温度を求めるため初層溶接を想定した U スリット型拘束割れ試験と観測窓などのはめ込み溶接を想定し

たはめ込み型多層溶接割れ試験を行った。試験片の形状を Fig. 6 に示す。

U スリット型拘束割れ試験は大気中の水蒸気分圧を 20 mm Hg (25℃, 84%), 25 mm Hg (30℃, 80%), 30 mmHg (32℃, 84%) の 3 水準, ワイヤ送給速度を 30 cm/min と 70 cm/min の 2 水準, 予熱温度を 75℃, 100℃, 125℃ の 3 水準とし, 溶接入熱 10 kJ/cm で 1 パス溶接をそれぞれ 2 回の繰返しで行った。

溶接終了直後と 48 h 経過後とに染色浸透探傷試験に

Fig. 7 Relation between preheat temperature and crack ratio

Fig. 8 Relation between partial pressure of water vapour and required preheat temperature

より表面割れ率を測定し, また 48 h 以上経過後に 5 断面のマクロ試験により断面割れ率を測定した。Fig. 7 に水蒸気分圧 25 mmHg における予熱温度と割れ発生率との関係を示し, Fig. 8 に水蒸気分圧と割れ防止予熱温度の関係を示す。水蒸気分圧 20 mmHg の場合, 75℃の予熱で割れは認められず, 水蒸気分圧 25 mmHg 及び 30 mmHg の場合, 100℃以上の予熱で割れは認められなかった。

はめ込み型多層溶接割れ試験は水蒸気分圧 25 mmHg (30℃, 80%) のもとで予熱温度を 50℃, 100℃ の 2 水準について溶接入熱 20 kJ/cm で実施した。

表側溶接を実施後, 裏はつりを行い染色探傷検査を行ったのち, 裏側溶接を行って溶接終了 48 時間経過後に磁粉探傷検査と超音波探傷検査, さらに 7 日後に再びこれらの検査と X 線検査を実施した。

非破壊検査終了後, 8 断面のマクロ試験を行ない割れの有無を調べた結果, 予熱温度 50℃, 100℃ のいずれの場合も割れの発生は認められなかった。

これらの結果から高温多湿時の水蒸気分圧 (約 25 mmHg) を考慮して, 予熱温度を 100℃ 以上に設定した。

5.1.2 継手性能試験

HT 100 のような高レベルの高張力鋼では, 溶接部の機械的性質は溶接施工条件の影響を大きく受ける。そこで適正溶接施工条件 (入熱量, ワイヤ送給速度) を設定するため, 予熱バス間温度を 100℃, 150℃ の 2 水準, 入熱量を 15, 20, 25 kJ/cm の 3 水準, ワイヤ送給速度を 50, 100, 140 cm/min の 3 水準として, Table 3 に示す条件で TIG 溶接を行い, 溶接金属引張試験 (JIS Z 3111 A-1 号), 継手引張試験 (JIS Z 3121-1 号), 側曲げ試験 (JIS Z 3122-3 号) およびシャルピー衝撃試験 (JIS Z 3112-4 号) を行った。

Table 3 Welding Conditions

No.	Thickness (mm)	Heat input (kJ/cm)	Preheat and interpass temperature (°C)	Wire feeding rate (cm/min.)
1	60	15	100	50
2			150	50
3			100	50
4		20	100	100
5			150	50
6			150	100
7		25	100	100
8			150	100
9			150	140
10	35	20	100	100
11	20		100	100

Fig. 9 Dimensions of test plate and location of test specimens

Fig. 10 Relation between cooling rate and proof stress

試験板の形状と試験片採取位置を Fig. 9 に示す。なお開先形状は U とした。

溶接部の機械的性質は 540℃ における冷却速度と相関があると考えられる。そこで得られた結果を 540℃ における冷却速度で整理した。

冷却速度の算出にはローゼンタールの式¹⁾より求めた次式を使用した。板厚 35 mm については (1) 式と (2) 式を補間した。

板厚 20 mm 以下

$$C.R. = 2\pi\lambda c\rho (Vh/EI)^2 (540-T_0)^3 \dots\dots\dots(1)$$

板厚 40 mm 以上

$$C.R. = 2\pi\lambda (V/EI) (540-T_0)^2 \dots\dots\dots(2)$$

T_0 = 初期温度 (℃), λ = 熱伝導度,
 c = 比熱, ρ = 密度, V = 溶接速度 (cm/sec),
 h = 板厚 (cm), E = 電圧, I = 電流

540℃ における冷却速度と溶接金属の 0.2% 耐力との関係を Fig. 10 に示すが、冷却速度の低下に伴い、0.2%

Fig. 11 Relation between cooling rate and charpy absorbed energy

耐力は低下する。この結果を一次式で回帰すると図中に示すように、 $Y = 1.333X + 70.67$ となった。ここで 98% の信頼限界で 0.2% 耐力を 90 kgf/mm² 以上に保証するには、540℃ における計算上の冷却速度を 20.5℃/sec 以上にする必要がある。溶接金属部の伸びは 14.5 ~ 22.5% であり、良好な値が得られた。また継手引張試験結果、側曲げ試験結果も良好であった。

Fig. 11 に溶接金属の 540℃ における計算上の冷却速度とシャルピー衝撃吸収エネルギーとの関係を示すが、シャルピー衝撃吸収エネルギーと冷却速度の間に明りような相関関係は見られず、ほぼ 20 kgf·m 以上の良好な値が得られた。

以上の結果から、540℃ における計算上の冷却速度が 20.5℃/sec 以上となる溶接施工条件で溶接すれば、良好な継手性能が得られることが明らかになった。

5.1.3 溶接施工条件の設定

従来、鋼、特に高張力鋼の溶接においては、低温割れ防止のために予熱を行う例が一般的である。しかし通常最低予熱パス間温度が規定されるだけで、作業性を無視すれば、予熱パス間温度は最低予熱パス間温度より高いことが要求されるのみである。

ところが前項で明らかにしたように、本論文で取扱う HT 100 鋼では、継手性能、特に 0.2% 耐力は溶接冷却時の冷却速度に大きな影響を受け冷却速度が小さざると目標の耐力を得られない。

したがって、HT 100 鋼の溶接においては、冷却速度

Table 4 Allowable TIG weld heat input of HT 100

Thickness (mm)	Preheat and interpass temperature(°C)	Calculated cooling rate at 540°C (°C/sec)	Allowable weld heat input (kJ/cm)
20	100	20.5	18
	150		15
	200		12
40	100		25
	150		19
	200		15

を一定の値以上に確保するために、割れ防止予熱パス間温度に応じて溶接入熱量が制限される。Table 4 には予熱パス間温度に応じた入熱限界量について(1)式と(2)式により求めた結果を示すが、予熱パス間温度の上昇に応じて許容入熱限界量が大きく低下し、実施工にあたっては溶接入熱量に応じてパス間温度を厳しく管理する必要があることがわかる。

6. 結 言

本報では 2000 m 深海潜水調査船に使用される HT 100 鋼の調質熱処理施工法と TIG 溶接施工法について検討を行った。得られた主な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 0.2%耐力 90 kgf/mm² 以上、0℃におけるシャ

ルピー衝撃吸収エネルギー 7 kgf・m 以上を得るには調質熱処理時の 700~400℃における焼入れ冷却速度を 3℃/sec 以上にする必要がある。

(2) 板厚 60 mm、内径 2320 mm の HT 100 鋼製半球殻をかくはん装置付水そうで調質熱処理した結果、焼入れ冷却速度は 1 回目の保持温度 870℃の場合で 5.7℃/sec ($\sigma=1.2℃/sec$)、2 回目の保持温度 800℃の場合で 6.2℃/sec ($\sigma=1.3℃/sec$) であり、目標の 3℃/sec 以上を満足する冷却速度が得られた。

(3) TIG 溶接における割れ防止予熱温度は水蒸気分圧 20 mmHg の場合 75℃、25 mmHg の場合 100℃である。

(4) TIG 溶接金属部の 0.2%耐力は溶接部の 540℃における冷却速度が遅くなると低下し 90 kgf/mm² 以上を 98%の信頼度で確保するには 20.5℃/sec 以上の計算上の冷却速度にする必要がある。

なお、実物大模型の製作およびその解体試験結果でも良好な結果が得られ、現在 2000 m 深海潜水調査船は建造中 (昭和 56 年 10 月完成予定) である。

おわりに、本研究について有益な御指導を賜った、寺沢一雄 大阪大学名誉教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) D., Rosenthal, Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, Weld. J., 20 (1941), 220S.