(昭和 59 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

深海潜水調査船チタン合金耐圧殻の工作法 に関する研究 (第 1 報)

正員 遠 藤 倫 正* 正員 横 田 公 男*
 正員 笹 野 量 一 郎* 正員 豊 原 力*
 正員 高 野 元 太** 安 井 健 一****
 西 村 孝***

Research on Fabrication Procedure of Spherical Pressure Hull Made
from Titanium Alloy for Deep Submersible

by Michimasa Endo, *Member* Kimio Yokota, *Member*
 Ryoichiro Sasano, *Member* Tsutomu Toyohara, *Member*
 Genta Takano, *Member* Ken-ich Yasui
 Takashi Nishimura,

Summary

As the new project of a deep submergence research vehicle following "SHINKAI 2000", 6000 m vehicle is now under contemplation in Japan. One of the essential themes for a 6000 m vehicle is how to reduce the weight of the vehicle in order to achieve excellent maneuverability and operational efficiency. A pressure hull material with a high strength to density ratio is indispensable for this application.

Some of the authors of this paper have been studying the material properties and fabrication procedure for both ultra-high strength steel (10 Ni-8 Co Steel) and titanium alloy (6 Al-4 VELI). As to 10 Ni-8 Co steel, the pressure hull fabrication procedure have already been established. As to titanium alloy, it was utilized for the small pressure vessels of SHINKAI 2000.

In this paper, the authors have constructed the full-scale model of a titanium alloy (6 Al-4 VELI) pressure hull, and established the fabrication procedure of the titanium alloy pressure hull.

1 緒 言

“しんかい 2000”に続く我国の深海潜水調査船プロジェクトとして、6,000m 級潜水調査船が計画されている。この種の大深度潜水調査船では、潜水船の性能および運用効率を高めるために、潜水船の重量軽減が極めて重要な課題とされている。

この課題に対処するため、著者らの一部は潜水調査船の耐圧殻材料として、比強度、耐海水性等の特性を考慮して超高張力鋼 (10Ni-8 Co 鋼) とチタン合金 (6 Al-4

VELI) を対象に、材料および工作法の研究を実施してきた。すなわち、10 Ni-8 Co 鋼については TIG 溶接、電子ビーム溶接、熱処理、等の要素技術の研究および実物大模型の製作・解体などを行い、耐圧殻工作法をすでに確立している^{1)~3)}。またチタン合金については、“しんかい 2000”の小型耐圧容器に、6 Al-4 VELI チタン合金を実用し⁴⁾、その後も要素技術の研究開発を進めてきたが⁵⁾、大型の構造物である耐圧殻の製造技術は未開発であった。

このたび、著者らは国内で大型チタン合金板の製造が可能となったのを機として、チタン合金に関する要素技術を総合的に確認し、チタン合金製耐圧殻の工作法を確立することを目的に、実物大模型の製作を行った。なお本研究で製造した圧延板素材および実物大模型は、チタ

* 三菱重工業(株)神戸造船所

** 三菱重工業(株)高砂研究所

*** (株)神戸製鋼所中央研究所

**** (株)神戸製鋼所チタン本部

Table 1 Effect of application of Ti-alloy

材 質	0.2%耐力 (kgf/mm^2)	比 重 (g/cm^3)	比 強 度 0.2%耐力 比 重 (kgf/cm^2 $\div \text{g/cm}^3$)	耐 圧 殻*				潜 水 船 ^{1,2} 重 量 差 (ton)
				板 厚 ¹⁾ (mm)	重 量 (ton)	浮 量 (ton)	水中重量 (ton)	
6Al-4V ELI チタン合金	≥ 81	4.42	18.3	68.0	4.66	5.28	-0.62	-
10Ni-8Co 鋼	≥ 120	7.85	15.3	48.5	5.82	4.98	0.84	-
差	-	-	-	-	-1.17	0.30	-1.48	-2.79

* 内径 2 m 安全率 1.55 真球度 1.00, 開口補強材・ハッチ重等を含む。

** 加工公差 0.5 mm (チタン 10Ni-8Co) 及びくされ代 1.0 mm (10Ni-8Co のみ) を含む。

*** 浮力材の重量を加味した値

Fig. 1 Shape and size of full scale model

ン合金としては我国で最大のものである。

2 チタン合金の特色

チタン合金は鋼材に比べ、海水腐食に対して極めて有利であると共に、鋼材に比べて比重が小さく、比強度 (0.2% 耐力/比重) を大きくとれるため、耐圧殻用材料とした場合、重量を大幅に軽減できる特徴がある。Table 1 に 6Al-4V ELI チタン合金および 10Ni-8Co 鋼を 6000m 級潜水調査船の耐圧殻に使用した場合の重量の試算例を示すが、6Al-4V ELI チタン合金では、潜水調査船の重量全体を 2.79ton (10% 以上) 軽減できることとなる。このようなチタン合金の特徴を生かして、アメリカおよびフランスではすでに潜水調査船の耐圧殻に実用されている。

3 実物大模型の形状

実物大模型の形状を Fig. 1 に示す。

N半球およびS半球の赤道リングに 6Al-4V ELI チタン合金を用い最終板厚を 70 mm 内径を 2 m とした。また、N半球には、実際の耐圧殻を模擬して、6Al-4V ELI チタン合金の視窓貫通金物 (500 mmφ) 2 個、

電線貫通金物 (800 mmφ) 1 個を取り付けると共に、ハッチ開口 (500 mmφ) を設けた。

S半球には、N半球と溶接される赤道リング以外の部分は経済性見地から、板厚 30 mm の純チタン (JIS3 種) を使用した。

4 実物大模型の製作

実物大模型製作手順の概略を Fig. 2 に、各工程における詳細施工方法を以下に示す。

4.1 素材の製造

4.1.1 圧延板素材

N半球用圧延板は、真空溶解による 9ton インゴットから、分塊鍛造→圧延を行って板厚 115 mm, 幅 3400 mm, 長さ 4000 mm とした。Fig. 3 に製造方法を、Fig. 4 に外観を示す。

なお、インゴットから化学分析試料を圧延板の Top 側および Bottom 側コーナ部から引張試験片を採取し、品質の確認を行った。

4.1.2 赤道リング素材

赤道リング素材は、5ton インゴットからビレット鍛造→据え込み鍛造を行って一次素材とし、更に内径加工

Fig. 2 Scheme of construction sequence of full scale model

Fig. 3 Production procedure of heavy thickness plate

Fig. 4 Appearance of hemisphere blank

Fig. 5 Production procedure of equator ring

後、リング鍛造→リング圧延→STOA 熱処理 (Solution treatment and over aging ; $920^{\circ}\text{C} \times 2\text{HrWQ} + 705^{\circ}\text{C} \times 2\text{HrAC}$) を行って内径 2000 mm, 肉厚 80 mm, 高さ 220 mm に仕上げた (Fig. 5)。

また、圧延板素材と同様に、インゴットから化学分析試料を、余長部から引張試験片を採取し、品質を確認した。

4.1.3 貫通金物素材

貫通金物素材は、赤道リングと同じ 5ton インゴットからビレット鍛造→据え込み鍛造を行って、電線貫通金物については、板厚 150 mm, 直径 920 mm に、視窓貫

Fig. 6 Production procedure of penetrator's materials

通金物については、板厚 175 mm、直径 530 mm とした。また電線貫通金物には球面状にするための熱間成形を加えた後、STOA 熱処理を行い、視窓貫通金物については直接 STOA 熱処理を行って、素材とした (Fig. 6)。

なお、視窓貫通金物 2 個のうち 1 個の余長部から、引張試験片を採取し、品質を確認した。

素材の品質確認結果を Table 2~3 に示すが、いずれも目標 (AMS 4907 C 準拠) を満足する良好な結果であった。

4.2 半球熱間成形および熱処理

N 半球は、圧延板素材から切り出した、板厚 115 mm、

Table 2 Chemical compositions of materials

素材名	規格位置	元素 (%)							
		Al	V	Fe	C	O	H	N	その他
半球用 5 トンインゴット	T	6.38	4.18	0.200	0.008	0.092	0.0054	0.0041	<0.090
	M	6.42	4.19	0.198	0.011	0.101	0.0052	0.0032	<0.084
	B	6.45	4.17	0.186	0.010	0.094	0.0041	0.0046	<0.090
貫通金物及び赤道リング用 5 トンインゴット	T	6.30	4.13	0.209	0.010	0.090	0.0024	0.0043	<0.087
	B	6.35	4.18	0.211	0.010	0.094	0.0053	0.0034	<0.085

※ その他の分析元素

Sn, Mo, B, Si, Y, Ni, Mn, C₀, Mg, Cu, Cr

Table 3 Tensile properties of materials

供試材	方向・位置	特性	引張強さ kgf/mm ²	耐力 kgf/mm ²	伸び %	絞り %
			88 以上	81 以上	10 以上	-
圧延板 STOA 材	TOP	L	表層部 97.9 (97.9)	89.9 (89.8)	17A (17)	43 (43)
			1/2T 91.4 (91.6)	83.7 (84.1)	14A (14)	28 (27)
			3/4T 92.4 (92.5)	85.2 (85.3)	14A (14)	32 (32)
		T	表層部 97.8 (98.1)	90.6 (90.9)	16A (16)	40 (41)
			1/2T 91.7 (91.9)	85.0 (84.3)	13A (14)	23 (23)
			3/4T 93.1 (93.2)	86.6 (86.6)	15A (14)	26 (26)
	BOTTOM	L	表層部 97.8 (98.1)	90.6 (90.9)	16A (16)	40 (41)
			1/2T 91.7 (91.9)	85.0 (84.3)	13A (14)	23 (23)
			3/4T 93.1 (93.2)	86.6 (86.6)	15A (14)	26 (26)
		T	表層部 97.8 (98.1)	90.6 (90.9)	16A (16)	40 (41)
			1/2T 91.7 (91.9)	85.0 (84.3)	13A (14)	23 (23)
			3/4T 93.1 (93.2)	86.6 (86.6)	15A (14)	26 (26)
貫通金物 STOA 材	半球方向	半球方向	表層部 96.1 (96.2)	87.9 (88.0)	19A (18)	43 (43)
			1/4T 92.0 (92.0)	84.8 (84.6)	15A (16)	39 (39)
			1/2T 90.9 (91.1)	83.7 (84.0)	14A (15)	34 (34)
		換装方向	表層部 95.9 (96.2)	88.1 (88.3)	17A (16)	41 (40)
			1/4T 90.7 (90.7)	83.8 (83.8)	17A (16)	36 (35)
			1/2T 89.3 (89.3)	82.5 (82.6)	16A (16)	34 (35)
	軸方向	1/2T	91.4 (91.2)	81.8 (81.8)	13A (14)	25 (26)
			90.9 (91.2)	81.8 (81.8)	14A (14)	27 (26)
		換装方向	表層部 95.9 (96.1)	87.6 (87.6)	15A (15)	41 (42)
			1/4T 94.6 (94.4)	86.3 (86.2)	17A (17)	44 (42)
			1/2T 95.5 (95.6)	87.3 (87.2)	16A (17)	40 (42)
		換装方向	表層部 95.2 (95.1)	86.4 (86.5)	17A (17)	44 (43)
赤道リング STOA 材	半球方向	1/2T	95.9 (96.1)	87.6 (87.6)	15A (15)	41 (42)
			96.2 (96.2)	87.6 (87.6)	15A (15)	42 (42)
			94.9 (94.9)	86.4 (86.5)	16A (16)	44 (43)
	換装方向	1/4T	94.6 (94.4)	86.3 (86.2)	17A (17)	44 (42)
			94.1 (94.1)	86.1 (86.1)	17A (17)	44 (42)
			95.6 (95.6)	87.3 (87.2)	16A (17)	40 (42)

(注) ※ 換装方向は除く

Table 4 Plate thickness and inner radius of hemisphere after STOA

傾度 (°)	0	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	90° (頂点)
0°	968.8 138.3	967.8 128.5	980.6 121.2	979.1 118.4	973.6 114.0	972.2 108.9	970.7 106.1	970.0 104.6	979.0 104.5
30°	973.4 136.8	972.8 126.7	978.6 120.9	977.1 117.4	-	-	-	970.4 104.5	-
60°	982.5 137.1	987.6 127.3	983.4 121.0	990.4 117.9	979.8 113.7	975.7 109.7	973.8 106.2	971.3 104.6	-
90°	972.2 139.2	977.1 130.4	993.5 123.0	991.6 119.5	981.7 116.2	976.7 110.4	974.5 106.2	971.8 104.8	-
120°	966.9 137.8	987.8 128.8	991.8 122.6	990.0 118.2	979.9 114.6	976.3 110.4	973.3 106.2	971.0 104.8	-
150°	978.3 133.9	982.8 128.0	994.4 121.4	991.8 116.9	-	-	-	970.1 105.4	-
180°	974.2 129.0	973.2 128.1	983.4 119.5	977.0 115.7	974.3 113.1	972.2 107.5	971.0 105.1	969.8 105.2	-
210°	968.1 133.0	988.2 127.5	993.4 120.2	989.0 116.4	-	-	-	968.8 105.1	-
240°	986.8 134.1	973.4 128.6	993.6 121.5	993.2 117.8	980.6 113.4	973.7 109.3	971.5 105.9	978.1 104.9	-
270°	977.8 132.0	975.9 131.5	985.0 123.4	982.5 119.7	975.2 115.0	972.7 110.0	969.8 106.4	968.6 104.5	-
300°	986.6 137.6	981.2 131.0	983.2 124.1	984.6 119.9	976.5 114.6	971.6 110.7	970.0 106.4	968.4 105.9	-
330°	968.2 139.7	972.7 130.0	986.6 123.3	988.3 119.3	-	-	-	968.8 105.9	-

〔備考〕 上 球 内 半径
下 球 厚 度

Table 5 Mechanical properties of hemisphere

試験の種類	方向	試験片 採取位置	引張強さ (kgf/mm ²)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
引張試験	L	表層部	97.5 (97.4) 97.2	89.2 (89.2) 89.2	17A (17) 16A	46 (45) 44
		1/2T	91.4 (91.6) 91.7	84.4 (84.4) 84.3	14A (14) 14A	23 (25) 27
	T	表層部	97.1 (96.9) 96.6	88.6 (88.6) 88.6	15A (15) 14A	41 (40) 38
		1/2T	94.5 (93.5) 92.5	86.9 (85.8) 84.7	14A (14) 13A	26 (23) 19
目標値	-	-	88 以上	81 以上	10 以上	-

※ 試験片寸法 E.75d G.L. = 35

Fig. 7 Hot forming and STOA procedure of hemisphere

直径 3140 mm のブランクを、8000ton プレスにより、内半径 985 mm に熱間成形して製作した。また、熱間成形後半球全体の STOA 熱処理を行った (Fig. 7)。

熱処理後の板厚および形状計測結果を Table 4 に示す。最大板厚は赤道部の 140 mm、最小板厚は、頂部付近の 105 mm であった。また内半径は 968 mm~994 mm の範囲に納まっており、内径 2m、板厚 70 mm の半球を削り出すのに十分な余裕を持ったものであった。

また、熱処理後の半球余長部より、テストピースを採取し、引張試験を行った (Table 5)。試験結果は目標を満足する良好な値であり、半球殻として、十分な性能を有するものと推定される。

4.3 貫通金物はめ込み溶接 (電子ビーム溶接)

N半球はまず荒切削により、内外面 5 mm 残し、(板厚 80 mm) に削り出し、その後貫通金物用穴明けを行った。一方、貫通金物も、内外面 5 mm 残しに荒切削し、はめ込み継手開先面は、N半球貫通金物用穴に合わせて加工した。

貫通金物ははめ込み溶接は、半球をターンテーブル上に貫通金物が真上にくるようにセットし、電子銃を固定して、ターンテーブルを回転させながら、裏当金付下向姿勢で行った。電子ビーム溶接装置は 45 kW タイプを使用した。

このときの、溶接条件は予備試験を行って Table 6 のように決定した。この条件で下向溶接を行ったときの予備継手性能試験結果は、Table 7 に示すように目標を満足する良好な値であった。

貫通金物ははめ込み溶接後および SR 後形状計測を行っ

Table 6 Welding conditions of EBW

継手	板厚	姿勢	真空度 (mmHg)	溶接条件			溶接時間	その他	継手形状
				加速電圧 (kV)	ビーム電流 (mA)	溶接速度 (mm/min)			
電線貫通金物	80	下向 (球心方向)	1x10 ⁻⁴	55	400	275	10 分	スロープ アップ 15 秒 スロープ ダウン 30 秒	
継手 # 1				55	400	275	6.5 分		
継手 # 2				55	400	275	6.5 分		
赤道	75	横 向		60	480	400	18 分	スロープ アップ 30 秒 スロープ ダウン 30 秒	

(使用設備) 45kW EBW装置

Fig.8 Result of shape measurement of hemisphere (after penetration welding)

Fig.9 Result of shape measurement of hemisphere (after SR)

Table 7 Tensile properties of penetrating and equator joint

接 合 部	板 厚 (mm)	加速電圧 (kV)	ビーム電流 (mA)	溶接速度 (mm/min)	採取位置	0.2 耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	収 縮 (%)
下 向	80	55	400	275	1/4t	81.6 82.0	95.1 94.1	17 15	34 36
					1/2t	82.8 82.3	95.5 95.7	16 14	23 36
					3/4t	83.9 82.8	95.5 97.1	14 14	32 32
横 向	75	60	480	400	1/4t	83.6 84.3	98.0 97.6	18 14	28 42
					1/2t	86.5 85.7	100.1 99.8	11 13	30 28
					3/4t	88.2 88.7	100.6 101.7	14 14	24 28
目 標 値					-	81 以上	88 以上	10 以上	

試験片寸法 4.0φ G.L. = 14

た結果をFig. 8, 9 に示すが、電子ビームはめ込み溶接による落込み量は最大 2.1 mm であり、SR による形状変化も殆ど見られなかった。

4.4 溶接後熱処理

溶接後熱処理の目的の一つに溶接残留応力の除去がある。著者らは以前に溶接後熱処理の溶接残留応力に及ぼす影響を Relaxation 試験により評価している³⁾。その結果 550°C×5 hr の後熱処理では 75%、650°C×5 hr の後熱処理では 99% の残留応力が除去されることを明らかにした。また電子ビーム溶接継手の機械的性質は（550～650°C）の範囲の後熱処理では差がなかった。

ここでは、残留応力を十分除去するために 650°C の後熱処理温度を選定した。

チタン合金は 400°C 以上の高温で空気にさらされると表面にスケールが付着する。潜水船の耐圧殻の製作において最終溶接後熱処理後、内外面のスケール除去をすることは困難である。そこで溶接後熱処理においては、あらかじめ表面に酸化防止剤を塗布し、熱処理も Ar 雰囲気で行った。この方法により、表面の酸化を完全に防止することができた。

4.5 半球三次元機械加工

貫通金物のはめ込み溶接後、N半球内外面の三次元機械加工を行った。

“しんかい 2000”の耐圧殻製作時には、まず、半球を真球に削り出した後、貫通金物の取り付けを行う手順を踏んでいたため、最終球殻状態で、はめ込み溶接（TIG 溶接）による溶接変形を残したままの状態であった。今回の三次元機械加工法では、半球荒切削状態で、先に貫通金物のはめ込み溶接（電子ビーム溶接）を行い、その後貫通金物突起部も含めて、半球を正規の形状（真球）に削り出すため、最終球殻状態で、ほぼ真球とすることができる（Fig. 10）。

Fig. 11 に示すように、三次元機械加工では、まず NC 旋盤を用いて一般球面部の旋削を行い、次に NC 横中ぐり盤を用いて貫通金物突起部をサーフェシング加工する。最後にこれらの残り部を再び NC 旋盤を用いて断続旋削する。突起部サーフェシング加工の概要を Fig. 12 に、加工状況を Fig. 13 に示す。

4.6 赤道継手電子ビーム溶接

三次元機械加工を完了したN半球と、赤道リングのついたS半球とを赤道線上で電子ビーム溶接により結合した。

赤道継手電子ビーム溶接は、全球を、赤道が水平になるようにターンテーブル上にセットし、電子銃を固定して全球を回転させながら、横向姿勢で行った。なお、このときの板厚は、赤道外面 5 mm 残しの 75 mm とした。溶接装置は貫通金物のはめ込み溶接と同じものを使用した。

溶接条件は予備試験より Table 6 のように決定した。また、この条件で横向溶接を行ったときの、予備継手性能試験結果を、貫通金物のはめ込み継手と併せて Table 7 に示す。目標を満足する良好な値が得られた。

4.7 赤道部仕上げ加工

赤道継手電子ビーム溶接完了後、球全体の SR（応力

Fig. 10 Advantage of three dimensional machining

Fig. 11 Three dimensional machining procedure of hemisphere

Fig. 12 Scheme of mechanical surfacing of penetrator's protuberance

Fig. 13 Appearance of mechanical surfacing of penetrator's protuberance

Fig. 14 Appearance of completion of full scale model

験), UT (超音波探傷試験), PT (浸透探傷試験)を実施した。その結果を Table 8 に示す。RT はすべて合格 (ポジティブー 1), UT は貫通金物はめ込み継手の裏当金部 3 個所に、疑似インディケーションが見られたものの、三次元機械加工により消滅, PT はすべて無欠陥であり, 溶接部の表面および内部健全性は良好であることを確認した。

また, 最終完成状態における, 形状計測結果を Fig. 15, 16 に板厚計測結果を Fig. 17 に示すが, 形状については, 真球からのずれの量は最大でも 0.41 mm であり, 真球度 (局部曲率半径と計画半径の比) は 1.003 以内であることがわかった。板厚も一般球面部で 69.9 mm~70.3 mm, 赤道部で 70.3 mm~70.8 mm の範囲に納まっており, 実物大模型の形状は, 所期の値を十分満足するものであることが確認できた。

除去焼なまし)を行い, 赤道部の余肉を切削, 仕上げ加工を行って実物大模型の製作を完了した(Fig. 14)。

4.8 溶接部非破壊検査および最終形状板厚検査

溶接部非破壊検査については, 貫通金物はめ込み継手および赤道継手のそれぞれに対して RT (放射線透過試

Table 8 NDT result of EBW joints

処 手	溶 接 後				機 械 加 工 後				備 考
	RT	UT	PT		RT	UT	PT		
			内 面	外 面			内 面	外 面	
電線貫通金物	1級（無欠陥）	底面インディケーション2カ所	—	無欠陥	—	無 欠 陥	無欠陥	無欠陥	*** インディケーション位置
観窓 No.1	1級（無欠陥）	無 欠 陥		無欠陥	—	無 欠 陥	無欠陥	無欠陥	
観窓 No.2	1級（無欠陥）	底面インディケーション1カ所		無欠陥	—	無 欠 陥	無欠陥	無欠陥	
赤 道	1級（ボロシティー1）	無 欠 陥	無欠陥	無欠陥	—	無 欠 陥	—	無欠陥	

* 判定基準はJISを準用

** 小ギャップ法で施工

Fig.15 Result of shape measurement of full scale model (after equator welding)

5 評 価

5.1 超厚板チタン合金板製造技術

従来、我国のチタン合金製造能力は、5ton 程度のインゴットが最大であったが、このたび 6000m 級深海潜水調査船の耐圧殻を想定した場合の半球（直径 2m、板厚 70 mm）を製作するに必要な 9ton インゴットの製造が可能となった。

そこで、この 9ton インゴットを用いて幅 3400mm × 長さ 4000 mm × 板厚 115 mm の超厚板チタン合金板（6 Al-4 VELI）を製造し、要求性能を満足することを明らかにした。

このような大型の超厚板チタン合金の製造は国内では

初めてであり、その製造技術を確立した意義は大きいと言える。

5.2 チタン合金半球熱間成形技術

上記チタン合金板より、直径 3140 mm の円形ブランクを切り出し、内径 1970 φ の半球形に熱間成形加工を実施したが、これまで国内においてこのような大型圧延板を熱間成形した実績はなく、金型寸法の選定、保温方法等の施工技術を確立し、次の熱処理技術と併せて所定の形状を削り出せる半球を製作することができた。

5.3 チタン合金半球 STOA 熱処理技術

チタン合金半球を STOA 熱処理し、加熱温度、保持時間冷却方法等の施工技術を確立し、最終的に所期の機械的性能を有する半球を製作することができた。

Fig. 16 Result of shape measurement of full scale model (after SR)

Fig. 17 Result of thickness measurement of full scale model

5.4 超厚板チタン合金の電子ビーム溶接技術

一般にチタン合金は電子ビーム溶接施工の容易な材料と考えられている。しかし、潜水船耐圧殻のような超厚板材の円周溶接にあつては、ディスチャージ対策および始末端処理等の対策を十分にとる必要がある。

今回、貫通金物はめ込み溶接は下向部分溶込み、赤道継手溶接は横向貫通で行ったが、いずれも目外れ、割れ等の有害な欠陥はみられなかった。このことは、適正溶接条件の選定はもとより電子銃の差圧排気などにより、ディスチャージ対策をとったことおよび終端処理部のス

ロープコントロール条件を適正に選定したことによる効果も大きいと考えられる。また、予備継手性能試験ではいずれの継手形状の溶接も良好な機械試験結果が得られた。

以上のことより、超厚板チタン合金半球に対する電子ビーム溶接技術(貫通金物はめ込み継手:板厚 80 mm, 赤道継手:板厚 75 mm)を確立することができた。

5.5 半球三次元機械加工技術

耐圧殻の真球度を向上させることは、耐圧殻の軽量化にもつながり耐圧殻の設計・製作上重要な課題である。特に“しんかい 2000”の建造実績から溶接継手の近接した貫通金物の溶接部付近が最も真球度が低下することが知られている。そこで貫通金物溶接後三次元機械加工を行えば真球度を大きく向上させることができる。本研究においてチタン合金半球に対しても貫通金物突起部を含む半球の三次元機械加工法を適用し、また、三次元機械加工後の形状もほぼ真球であることを確認し、加工技術を確立することができた。

5.6 チタン合金板素材および溶接部の非破壊検査技術

これまで、チタンあるいはチタン合金厚板(概ね 25 mm 以上)の RT および UT の非破壊検査は一般的ではなく、技術的に未確立の状況であった。

今回、RT について、判定基準を、UT について、検査方法および判定基準を案画し、実物大模型に適用し、その信頼性評価に繋がることを確認した。

5.7 真球度

耐圧殻実物大模型の真球度を製作ステージ別にみると、貫通金物はめ込み溶接後が 1.020、同じく溶接後熱処理後が 1.021、半球三次元機械加工を行った後の赤道継手電子ビーム溶接後が 1.003、最終溶接後熱処理および赤道部仕上げ加工後が 1.003 であった。

著者らの一部は、以前に溶接法の真球度に及ぼす影響を内径 690 mm、板厚 21.5 mm のチタン合金半球小型モデルを用いて調べた。その結果では直径 175 mm の貫通金物を溶接した時の真球度は TIG 溶接法で 1.060、電子ビーム溶接法で 1.024 であった。

今回の試験で得られた貫通金物はめ込み溶接後の 1.020 の真球度は上述の小型モデルの結果と良く一致している。この結果から電子ビーム溶接を使用することにより、“しんかい 2000”の耐圧殻の製作で採用した TIG 溶接(真球度 1.062)よりも大幅に真球度を改善できることがわかった。これに加えて半球三次元機械加工の採用により、赤道溶接後および最終熱処理後も真球度

1.003 とほぼ真球にすることができた。

なお 650°C の溶接後熱処理の前後では真球度はほとんど変化せず、チタン合金の溶接後熱処理の真球度に及ぼす影響はないと考えられる。

6 結 言

“しんかい 2000”に続く、更に大深度の潜水調査船の計画に関して、著者らが、これまでに研究してきたチタン合金の材料および工作法に関する要素技術を、総合的に確認するために、6 Al-4 V ELI チタン合金を用いて実物大模型の製作を行った。

その結果、所期の形状精度を有する実物大模型が完成し、母材あるいは溶接継手の性能も目標を満足するものであった。

以上により、チタン合金に関する下記の要素技術が確認され、チタン合金製耐圧殻の工作法を確立することができた。

- (1) 超厚板チタン合金板製造技術
- (2) チタン合金半球の熱間成形技術
- (3) チタン合金半球および全球の熱処理技術
- (4) 半球三次元機械加工技術
- (5) 超厚板チタン合金の電子ビーム溶接技術
- (6) チタン合金素材および溶接部の非破壊検査技術

なお、この実物大模型は現在解体試験を実施中であり、その結果については、後日、第2報として報告したい。

この研究の実施にあたり御指導を賜った、山本善之東京大学名誉教授・横浜国立大学教授、佐藤邦彦大阪大学教授、木村啓造工学院大学教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 下山仁一，他：深海潜水調査船耐圧殻の溶接工作法に関する研究，三菱重工技報，Vol.13，No.4 (1976)。
- 2) 遠藤倫正，他：電子ビーム溶接の深海潜水船耐圧殻への適用の研究，日本造船学会論文集，第149号 (1981)。
- 3) 遠藤倫正，他：深海潜水船耐圧球殻の実物大規模による熱処理法に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第152号 (1982)。
- 4) 遠藤倫正，他：深海潜水調査船用チタン合金製耐圧容器，三菱重工技報，Vol.17，No.5 (1980)。
- 5) 笹野量一郎，他：厚板 Ti-6 Al-4 V 合金の電子ビーム溶接に関する基礎研究，三菱重工技報，Vol.20，No.2 (1983)。