(昭和 57 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

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

正員 遠 藤 倫 正* 正員 笹 野 量一^一郎*
正員 森 鼻 英 征* 正員 淵 上 勝 人*
豊 原 力* 正員 高 野 寛元 太**

Research on Heat Treatment Procedure of Deep Submergence
Research Vehicle's Pressure Hull using Full Scale Model

by Michimasa Endo, *Member* Ryoichiro Sasano, *Member*
Hideyuki Morihana, *Member* Katsuto Fuchigami, *Member*
Tsutomu Toyohara, Genta Takano, *Member*

Summary

In order to make oceanographic research activity more extensive, deep submergence research vehicle diving to the depth of 6000 m is being required in these days.

A pressure hull of the vehicle requires the material of high strength/weight ratio and good ability of manufacturing. In this point, 10 Ni-8 Co steel with the yield strength of 120 kgf/mm² can be said the most promising candidate for the pressure hull at present.

To give 10 Ni-8 Co steel enough strength and toughness, heat treatment (double-quenching and tempering) is indispensable.

From this respect, the authors conducted experimentally heat-treatment of 10 Ni-8 Co spherical shell using a full scale model.

The report presents the description on the heat-treatment procedure, including the experimental results, which are necessary to establish the whole manufacturing procedure of a pressure hull being combined with the welding procedure already established.

1 緒 言

わが国の海洋開発プロジェクトとして、海洋科学技術センターの 2,000 m 潜水調査船 (しんかい 2000)¹⁾が完成し、2,000 m 以浅の深海調査が可能となっているが、次のステップとして、さらに広範囲な調査活動を可能とする 6,000 m 級深海潜水調査船の必要性が指摘されている。

この深海潜水調査船は、しんかい 2000 と同様の機動性および運動性能が要求されるため、小型・軽量であることが必要要件となる。とりわけ、耐圧殻は重量/浮量比を小さくする必要性から、強度/重量比の高い材料を用いた、構造効率の高い球殻を採用する必要がある。

耐圧殻用材料としては、現在、降伏点 120 kgf/mm² 級の 10 Ni-8 Co 鋼が有力な候補材である。10 Ni-8 Co 鋼は 2 回焼入れ、1 回焼もどしの調質熱処理により、所

定の強度と靱性が得られる鋼種であるため、耐圧殻の製造過程において調質熱処理は不可欠である。

筆者らは、すでに 10 Ni-8 Co 鋼の溶接施工法として、TIG 溶接法²⁾と電子ビーム溶接法³⁾について実物大規模模型を使用して、その確立を行った。本論文においては、残された課題である調質熱処理法の確立を図るため、想定される種々の製作工程を考慮して、実物大規模の模型を使用して実験的研究を行った。

その結果、10 Ni-8 Co 鋼製耐圧球殻の製作工程で必要な半球殻ならびに全球殻状態における調質熱処理が可能であることを明らかにした。

2 深海潜水船耐圧殻の工作法

深海潜水調査船の耐圧殻は、比強度の高い材料が採用されるほか、真球度を高くして重量軽減を図る必要があるため、工作法としては信頼性が高く、かつ加工精度の高い方法を指向する必要がある。

10 Ni-8 Co 鋼製耐圧殻の工作法を確立するためには、

* 三菱重工業(株)神戸造船所

** 三菱重工業(株)高砂研究所

Fig. 1 Manufacturing process of pressure hull

半球熱間曲げ加工法，調質熱処理法，溶接法および機械加工法の要素技術の開発が必要である。要素技術中，熱間曲げ加工法と機械加工法は，しんかい 2000 で確立されているが，鋼種が異なるため，熱処理法と溶接施工法は新たに検討する必要がある。

筆者らは，10 Ni-8 Co 鋼の溶接法として，TIG 溶接法と電子ビーム溶接法について，すでに実物大模型を製作して検討した結果，いずれの溶接法も適用しうることを確認した²⁾³⁾。両者の特徴を挙げると，TIG 溶接法は，多層溶接で施工するため，多重熱サイクルにより溶接のままで母材と同等の継手性能が得られるが，溶接歪が大きくなる特徴がある。一方，電子ビーム溶接法は，1パスで施工するため，溶接歪が少ないが，溶接後熱処理により母材と同等の継手性能を得なければならないといった特徴がある。

今回の調質熱処理の確立にあたっては，まず耐圧殻の加工手順を検討した。その代表的な手順を Fig. 1 に示す。加工手順①は TIG 溶接法を用いるもので，しんかい 2000 と同じ手順である。加工手順②は電子ビーム溶接法を用い，溶接後熱処理 (T_2) を必要とするもので，①に比べて真球度の向上が期待できる手順である。加工手順③は電子ビーム溶接を用い，溶接完了後に調質熱処理 (QQT) を行うもので，残留応力のない冶金的に均一な球殻が得られる手順である。

これら3つの加工手順について，熱処理技術の面から考えると，加工手順①は2回の焼入れ (QQ) と焼もどし (T) をすべて半球状態で行い，加工手順②は QQ を半球状態で，T を半球と全球状態で行い，加工手順③は QQT をすべて全球状態で行うことになる。

今回の熱処理技術の研究にあたっては，10 Ni-8 Co 鋼の熱処理特性は熱処理シミュレーション試験により，すでに把握されている³⁾が，熱処理時の質量効果の点から，実物大規模の模型で調査することとし，6,000 m 深海潜水調査船の耐圧殻を対象とした。さらに，上述のいずれ

の加工手順に対しても対応するべく配慮し，半球状態での焼入れ試験，全球状態での焼入れおよび焼もどし試験を実施した。

3 供試材と熱処理試験方法

3.1 供試材

6,000 m 深海潜水調査船の耐圧殻の板厚は素材で 80 mm 程度が想定される。板厚 80 mm の 10 Ni-8 Co 鋼と軟鋼を供試した。10 Ni-8 Co 鋼の化学組成と機械的性質を Table 1 と Table 2 に示す。

3.2 実物大球殻模型の形状

6,000 m 深海潜水調査船の耐圧殻はしんかい 2000 の耐圧殻とはほぼ類似の形状と考えられ，内径は約 2 m の球殻と考えられる。Fig. 2 に製作した実物大球殻模型の形状を示す。内径 2 m，板厚 80 mm で，N 半球にハッチ開口 1 個を，S 半球にのぞき窓 2 個を備えた構造とした。N 半球の一部に 10 Ni-8 Co 鋼をはめ込み，この 10 Ni-8 Co 鋼にはあらかじめ Table 3 示す条件で電子ビーム溶接継手を設けた。

3.3 熱処理条件

10 Ni-8 Co 鋼は，2 回焼入れ 1 回焼もどしの調質熱処理が施されるが，機械的性質は概ね焼もどし熱処理により決定され，焼入れ熱処理の影響の少ないことを報告した³⁾。すなわち，Fig. 3 に示すように焼入れ冷却速度を $0.5^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上確保すると，焼もどし条件のみによって，引張特性と衝撃特性が決定される。焼もどし条件と引張特性との関係をテンパーパラメータで整理した結果を Fig. 4 に示す。この図から，耐力 $120 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ を保証する耐圧殻の焼もどし条件は，テンパーパラメータで 16.7×10^3 以下，すなわち，焼もどし保持時間を 10 時間とすると，保持温度を 522°C 以下とする必要がある。なお，衝撃特性は $490 \sim 530^{\circ}\text{C}$ の焼もどし温度範囲では十分高い値が得られる。

以上のことから，実物大模型の調質熱処理条件とし

Table 1 Chemical composition of 10 Ni-8 Co steel (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
0.13	0.12	0.20	0.003	0.002	9.86	1.95	1.01	7.90

(Thickness = 80 mm)

Table 2 Mechanical properties of 10 Ni-8 Co steel

Thickness (mm)	Direction	Tensile Test			Charpy Impact Test	
		0.2% Proof Stress (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elong. (%)	vE ₇₇₃ (kgf-m)	vE ₀ (kgf-m)
80	L	128.5	145.4	18.0	14.0	16.9
		128.0	145.6	18.0	12.1	17.6
	T	125.1	143.3	18.0	15.4	16.9
		126.1	143.9	18.0	14.7	17.4
					13.5	17.4
					15.0	16.4

Table 3 Electron beam welding conditions for 10 Ni-8 Co steel

Thickness (mm)	Accelerating Voltage (kV)	Beam Current (mA)	Welding Speed (mm/min)	ab (Do/DF)	Welding Position
80	90	400	200	0.78 (380/490)	Horizontal

Table 4 Conditions of heat treatment

No.	Component	Heat Treatment	Temperature	Time	Required Condition	Number of Measuring Points
1	N Hemisphere	Quench	830±20°C	1.5 hr	Cooling Rate More than 0.5°C/sec	25 pts
2	Sphere	1st Quench	925±20°C	1.5 hr		35 pts
3		2nd Quench	830±20°C	1.5 hr		35 pts
4		Temper	505±10°C	10 hr	Temperature 505±10°C	35 pts

て、焼入れ冷却速度を 0.5°C/sec 以上、焼もどし温度を 505±10°C (保持時間を 10 時間とし、テンパーパラメータで $16.1 \times 10^3 \sim 16.5 \times 10^3$) を管理目標とした。また、焼入温度は、 A_{c3} 点以上で第 1 回目を 925°C、第 2 回目を 830°C の条件⁵⁾を採用し、管理範囲を ±20°C とした。

2 章の耐圧殻の工作法で述べたように、6,000 m 深海潜水調査船の耐圧殻の調質熱処理の時期は、半球殻状態と全球殻状態の 2 つのケースが考えられる。調質熱処理の難易度から考えると、焼入れ時の球殻内面の冷却ならびに焼もどし時の保持温度の均一性から、全球殻調質熱処理は半球殻調質熱処理よりもかなり困難と予想される。

そこで、実物大模型の熱処理試験では、まず N 半球の焼入れ熱処理試験を行い、S 半球と溶接して全球殻としてから、焼入れ焼もどしの熱処理を行った。Table 4 に熱処理条件を示す。加熱はいずれも 300°C からの昇温

N-hemisphere S-hemisphere

Fig. 2 Configuration of full scale model (Plan view)

 Fig. 3 Effect of cooling rate at quench on mechanical properties of 10 Ni-8 Co base metal³⁾

速度を 55°C/hr とし、所定の温度まで加熱し、焼入れは 1.5 時間、焼もどしは 10 時間、所定温度保持し、その後水そうにて冷却した。なお、N 半球には 25 点 (板厚中央部 13 点、外面から 1/4 t 部 6 点、外面から 3/4 t 部 6 点)、S 半球には 10 点 (板厚中央部 5 点、外面から 1/4 t 部 3 点、外面から 3/4 t 部 2 点) の個所に CA 熱電対 (φ 3.2 mm) を取付け、保持温度と冷却中の温度を測定した。

4 熱処理試験結果

4.1 半球殻の焼入れ熱処理

焼入れ熱処理では、内外面の冷却を効果的に行う必要がある。試験に用いた N 半球には、直径 400 mm のハッチ開口があるので、この開口部を底にして水そうに投入する方法を採用し、半球内面の冷却を効果的に行えるように配慮して焼入れ熱処理試験を行った。

熱処理の保持温度、冷却時の温度変化を整理して、

Fig. 4 Effect of temper parameter on 0.2% proof stress of 10 Ni-8 Co weld and base metal³⁾

Table 5 Results of quench (Hemisphere, 830±20°C×1.5 hr)

Material	Location	Temperature (°C)	Temp. before Immersion (°C)	Temp. Reduction before Immersion (°C)	Average Cooling Rate (700-400°C) (°C/sec)
Mild Steel	1/2T	834 (827,846)	805 (800,818)	28 (22,34)	4.4 (3.9,5.4)
	1/4T	832 (830,833)	797 (792,800)	35 (32,38)	3.9 (3.2,4.8)
	3/4T	830 (825,838)	793 (792,796)	37 (33,42)	3.9 (3.6,4.3)
10Ni-8Co Steel	1/2T	844 (840,847)	805 (799,810)	39 (37,41)	3.2 (3.1,3.2)
	1/4T	840 (840,840)	799 (799,799)	41 (41,41)	3.5 (3.4,3.5)
	3/4T	840 (840,840)	790 (787,792)	51 (48,53)	4.9 (4.8,4.9)

Note: Showing Average Value, Minimum and Maximum one in ().

Table 5 に示す。焼入れ保持温度は $830 \pm 17^\circ\text{C}$ で目標精度を満足し、板厚測定位置による影響は少ない。炉出しから水没までの搬出中の温度低下は、22~53°C であり、3/4 t が若干大きい。水没前の温度は 787~818°C で、いずれの計測点においてもオーステナイト組織の温度であった。

700~400°C における平均冷却速度は、板厚測定位置による差は少なく、3.1~5.4°C/sec である。材質による差をみると、10 Ni-8 Co 鋼は 3.1~4.9°C/sec、軟鋼は 3.2~5.4°C/sec の範囲であり、目標の 0.5°C/sec 以上をいずれも十分満足した。

Fig. 5 Heat treatment of spherical model

4.2 全球殻の焼入れ熱処理

全球殻状態で調質熱処理を行う場合、焼入れ時の冷却速度を確保するため、内面の水冷を効果的に行う必要がある。球内部に素早く水を入れることと、内部で発生した水蒸気を外部へ放出させることが重要となる。そこでハッチ開口部から水が入り、のぞき窓の開口部から水蒸気が放散するように球殻を水没させ焼入れ熱処理を行った。また熱処理時の変形を防止するための治具を装備した。この状況を Fig. 5 に示す。

Table 6 に、925°C からの第 1 回焼入れ熱処理時の試験結果を、Table 7 に、830°C からの第 2 回焼入れ熱処理時の試験結果を示す。焼入れ保持温度は $925 \pm 15^\circ\text{C}$ 、 $830 \pm 9^\circ\text{C}$ の範囲であった。低温側に一部目標値を下回る個所があり、これは主に外面から 3/4 t の位置であった。全球殻状態では外面からの加熱であるため、外面に比較して内面の温度が低く、今回 1/2 t の位置の熱電対で温度制御していたため、内面側が目標値をはずれたことが主な原因と考えられる。しかし、焼入れ時の温度がオーステナイト化温度以上であればよいので、特に問題はないと判断した。

10 Ni-8 Co 鋼の板厚中央部における 700~400°C 間の平均冷却速度は、920°C 焼入れの場合で 3.1~3.2°C/sec、830°C 焼入れの場合で 3.0~3.2°C/sec であり、焼入温度による差はほとんどなかった。またこの冷却速度は半球状態の焼入れ時とはほぼ同じ値であった。

軟鋼の板厚中央部における平均冷却速度は 925°C 焼入れの場合で 2.2~3.6°C/sec、830°C 焼入れの場合で 2.3~6.1°C/sec であった。いずれの場合も冷却速度の最も遅い部分は、水没の遅い上部ののぞき窓開口近傍であっ

Table 6 Results of 1st quench (Sphere, 925±20°C×1.5 hr)

Material	Location	Temperature (°C)	Temp. before Immersion (°C)	Temp. Reduction before Immersion (°C)	Average Cooling Rate (700-400°C) (°C/sec)
Mild Steel	1/2T	920 (905,935)	902 (868,920)	19 (10,29)	2.9 (2.2,3.6)
	1/4T	915 (905,927)	881 (868,898)	34 (24,50)	2.9 (2.2,3.4)
	3/4T	913 (898,931)	905 (890,919)	9 (3,12)	2.7 (1.8,3.8)
10Ni-8Co Steel	1/2T	931 (930,931)	918 (917,918)	13 (12,14)	3.2 (3.1,3.2)
	1/4T	933 (931,934)	904 (903,905)	29 (28,29)	3.6 (3.5,3.6)
	3/4T	931 (931,931)	914 (914,914)	17 (17,17)	3.9 (3.8,3.9)

Note: Showing Average Value, Minimum and Maximum one in ().

Table 8 Results of temper (Sphere, 505±10°C×10 hr)

Material	Location	Temperature (°C)	Temp. before Immersion (°C)	Temp. Reduction before Immersion (°C)	Average Cooling Rate (450-200°C) (°C/sec)
Mild Steel	1/2T	506 (495,515)	498 (483,510)	9 (5,15)	4.0 (3.1,4.5)
	1/4T	496 (495,508)	487 (480,497)	9 (5,12)	3.8 (3.1,4.4)
	3/4T	502 (495,515)	496 (483,512)	6 (3,12)	3.6 (3.3,3.8)
10Ni-8Co Steel	1/2T	514 (512,515)	507 (505,509)	7 (3,10)	2.5 (2.5,2.5)
	1/4T	512 (512,512)	505 (505,505)	7 (7,7)	2.6 (2.6,2.6)
	3/4T	512 (512,512)	503 (500,505)	10 (7,12)	3.1 (2.9,3.2)

Note: Showing Average Value, Minimum and Maximum one in ().

Table 7 Results of 2nd quench (Sphere, 830±20°C×1.5 hr)

Material	Location	Temperature (°C)	Temp. before Immersion (°C)	Temp. Reduction before Immersion (°C)	Average Cooling Rate (700-400°C) (°C/sec)
Mild Steel	1/2T	823 (810,836)	809 (791,829)	14 (7,20)	4.7 (2.3,6.1)
	1/4T	817 (800,835)	791 (770,816)	27 (19,33)	4.2 (3.0,5.1)
	3/4T	816 (800,830)	808 (790,823)	8 (2,12)	5.7 (1.7,9.2)
10Ni-8Co Steel	1/2T	838 (837,839)	826 (825,827)	12 (12,12)	3.1 (3.0,3.2)
	1/4T	835 (834,835)	815 (813,816)	20 (18,22)	3.6 (3.6,3.6)
	3/4T	832 (830,833)	821 (818,823)	11 (10,12)	4.6 (4.6)

Note: Showing Average Value, Minimum and Maximum one in ().

た。半球状態の焼入れと比較すると、平均値はほぼ同じであるが、全球殻の方が場所による差が大きいといえる。しかし、これらの冷却速度はいずれも目標の 0.5°C/sec 以上を十分に満足した。

4.3 全球殻の焼もどし熱処理

3.3 節で述べたように 10 Ni-8 Co 鋼では焼もどし温度の管理が最も重要である。そのため、所定温度保持は実体温度を熱電対でモニタリングしながら、加熱バーナを制御して行った。

Table 8 に焼もどし熱処理試験結果を示す。保持温度は 495~515°C の範囲で、目標を満足した。また板厚方向の測定位置間の差はほとんど生じなかった。このことから全球状態においても目標条件内で焼もどし熱処理が可能であることがわかった。

5 解体試験

5.1 熱処理による変形

調質熱処理において、熱処理により素材の所要の機械的性質を得ることが最も重要であるが、熱間曲げ加工時の余肉の決定と、熱処理後の機械加工時の切削代の確保のために、熱処理による変形量をも把握する必要がある。全球殻状態における調質熱処理には、変形防止治具を用いた。変形を適正に防止しうることを確認するため、球殻の各部の位置で熱処理の前後で形状計測を行い、熱処理による変形量を調べた。2 回焼入れによる半径の変化は平均で 5 mm の減少であり、その後の焼もどしによる変化は平均 0.2 mm の増加であった。

この結果、材質差による変態挙動に伴う変形量の差が全球殻の変形量に影響するものと考えられるが、全球殻状態で調質熱処理を行っても、大きな変形がなく、熱処理後の機械加工のための切削代が十分確保できるとの見通しが得られた。

5.2 機械的性質

調質熱処理を施した 10 Ni-8 Co 鋼とその電子ビーム溶接継手から引張試験片とシャルピー衝撃試験片を採取して、機械的性質を調査した。

引張試験片形状は JIS Z 2201 の 4 号試験片に準じた。母材と継手引張試験片は直径 8 mm のつば付きとし、溶接金属引張試験片は直径 4 mm とした。試験結果を Table 9 に示す。0.2% 耐力は母材で 126.0~129.2 kgf/mm²、溶接金属で 133.2~135.2 kgf/mm² であり、若干溶接金属が高目であった。また、引張強さは母材、溶接金属、溶接継手ともほぼ等しく 145.8~150.0 kgf/mm²

Table 9 Results of mechanical properties of 10 Ni-8 Co steel
(Base metal and welded zone)

Location	Direction	Tensile Test				Charpy Impact Test					
		0.2% Proof Stress (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elong. (%)	Reduc. (%)	Charpy Absorbed Energy ⁽¹⁾ (kgf-m)					
						0°C	-20°C	-50°C	-70°C	-96°C	-150°C
Base Metal	L	126.0 126.0	146.6 147.2	16.2 15.0	75.0 73.7	19.7	18.7	15.7	14.4	14.2	10.3
	C	127.7 129.2	145.8 146.0	14.5 15.0	72.5 73.7	18.3	17.5	15.5	12.9	11.8	9.8
Weld Zone	Weld Metal	135.2 133.2	149.4 149.8	21.4 21.4	72.8 72.8	16.0	16.2	13.0	12.9	11.7	8.6
	Welded Joint	127.8 127.2	148.2 150.0	14.7 15.0	69.7 72.5	-	-	-	-	-	-

(1) Average of 3 specimens

であり、従来のデータ³⁾とほぼ一致した。

シャルピー衝撃試験片形状は JIS Z 2202 の 4 号試験片を用いた。シャルピー吸収エネルギーは、母材が 0°C で 18.3~19.7 kgf-m, -70°C で 12.9~14.4 kgf-m であり、溶接金属は 0°C で 16.6 kgf-m, -70°C で 12.9 kgf-m であった。母材と溶接金属の値はほぼ同等で、いずれも良好な値であった。

この結果、全球殻状態において目標とする調質熱処理が実施できることが確認された。

6 考 察

耐圧球殻の直径は板厚に比べて十分大きいので、球殻を無限平板と仮定すると、焼入れ熱処理の冷却現象は一次元熱伝導問題となり、この関係式は (1) 式のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

初期条件: $t=0$ のとき $-l \leq x \leq l$ において $\theta = \theta_0$

境界条件: $x=0$ において $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$

この解を無次元化表示すると (2) 式のようになる。

$$\frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 - \theta_s} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n \cos \delta_n X}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} e^{-\delta_n^2 N_{F0}} \quad (2)$$

ただし

θ = 温度, θ_0 = 初期温度, θ_s = 冷却液温度 (水温),

$X = \frac{x}{l}$ (無次元座標), x = 板厚方向座標, t = 時間,

$2l$ = 板厚, K = 熱拡散率, c = 比熱, ρ = 比重,

λ = 熱伝導率, α = 熱伝達係数, $N_{F0} = \frac{K}{l^2} t$,

$N_{B1} = \frac{\alpha}{\lambda} l$ (Biot 数), δ_n は $\frac{\delta_n}{N_{B1}} = \cot \delta_n$ の正根

冷却曲線の計算にあたっては、材料の物理定数および材料と水との熱伝達係数が問題となる。これらの値は冷却中の各温度によって変化する。例えば軟鋼 ($C=0.06$

%, $Mn=0.4\%$) の場合, λ は 800°C で 28.5 W/mK, 600°C で 36.4 W/mK, 400°C で 45.2 W/mK となる⁶⁾。ここでは 700~400°C の間の冷却速度を検討しているので、計算を簡略化するために物理定数は 500°C の値を使用した。10 Ni-8 Co 鋼については実測値がないため、3.5 Ni 鋼, 9 Ni 鋼, 18 Ni マルエージング鋼のデータを Ni 量で整理し, Ni 量が 10% となる値を使用した。これらのことより、軟鋼については $\lambda=40$ W/mK, $=0.15$ kcal/kg°C = 630 W/kgK, $\rho=7.8$ g/cm³, 10 Ni-Co 鋼については $\lambda=30$ W/mK, $c=630$ W/kgK, $\rho=7.8$ g/cm³ を用いた。

次に熱伝達係数であるが、焼入れ冷却時には膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰、対流の領域を通る。しかし、ここで問題としているような 700~400°C の間の温度域では膜沸騰の領域であり、熱伝達係数もほぼ一定となる⁷⁾。従来の水冷却時の熱伝達係数の測定結果は 800~12,000 w/m²K となっている⁷⁾。そこで熱伝達係数を 800~10,000 w/m²K の間で変化させて板厚中央部曲線を Schneider の表⁸⁾より求めた。

搬出中の温度降下を考慮して、900°C から水冷した場合の、10 Ni-8 Co 鋼の冷却曲線を Fig. 6 に、軟鋼の冷却曲線を Fig. 7 に示す。また、800°C から水冷した場合の 10 Ni-8 Co 鋼の冷却曲線を Fig. 8 に示す。同様に 800°C から水冷した場合の軟鋼の冷却曲線も作成し、これらの図から 700~400°C の間の平均冷却速度を計算した。得られた結果を Fig. 9 と Fig. 10 に熱伝達係数を横軸として整理して示す。

700~400°C の平均冷却速度は、熱伝達係数の増加に伴い速くなるが、焼入温度が 900°C と 800°C では大きな差はなかった。また軟鋼の方が 10 Ni-8 Co 鋼に比べて、熱伝導率が高く、平均冷却速度も 0.3~0.8°C/sec 速い値であった。

今回の実験結果では冷却速度の平均値は 10 Ni-8 Co

Fig. 6 Cooling diagram of quench (Calculated, 10 Ni-8 Co, Q. temp. 900°C)

Fig. 7 Cooling diagram of quench (Calculated, Mild steel, Q. temp. 900°C)

Fig. 8 Cooling diagram of quench (Calculated, 10 Ni-8 Co, Q. temp. 800°C)

Fig. 9 Relationship between cooling rate and heat transfer coefficient at quench (900°C)

Fig. 10 Relationship between cooling rate and heat transfer coefficient at quench (800°C)

鋼の場合、925°C 焼入れで 3.2°C/sec、830°C 焼入れで 3.1°C/sec、軟鋼の場合、925°C 焼入れで 2.9°C/sec、830°C 焼入れで 4.7°C/sec であった。この値と計算結果から熱伝達係数を推測すると、10 Ni-8 Co 鋼は 925°C 焼入れ、830°C 焼入れ共に約 4,000 W/m²K となり、しんかい 2000 で使用した NS 90 鋼の約 3,800 W/m²K に近い値であった。軟鋼については、925°C 焼入れで約 2,000 W/m²K、830°C 焼入れで約 6,000 W/m²K となった。しんかい 2000 の実物大模型製作時の軟鋼製半球殻の 780°C 焼入れにおける熱伝達数は約 8,000 W/m²K であり、焼入温度が高くなるにつれて熱伝達係数が低くなっている。

このように軟鋼において熱伝達係数に大きな差がでたので、表面に錆が付着した場合の影響を検討した。すなわち、10 Ni-8 Co 鋼においては表面の錆の付着状況は 925°C 焼入れと 830°C 焼入れであまり差がみられな

ったが、軟鋼においては鍍の厚さが、925°C で約 0.5 mm, 830°C で約 0.2 mm と大きな差があった。このように表面に鍍が付着した場合の有効熱伝達係数は(3)式のように表わされている。

$$\frac{1}{\alpha_e} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda_1} \quad (3)$$

ただし

α_e = 有効熱伝達係数

α_1 = 表面からの熱伝達係数

l_1 = 鍍の厚さ, λ_1 = 鍍の熱伝導率

いま $\lambda_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{sec} = 0.72 \text{ kcal/mhr}^2 \cdot \text{C}^2$ (500°C の値) とすると, l_1/λ_1 は鍍が 0.2 mm の場合, 0.00033 m²K/W, 0.5 mm の場合 0.00082 m²K/W となる。ここで α_1 は 8,000 W/m²K (焼入温度 780°C の値) 以上と考えられるので $\alpha_1 = 8,000 \sim \infty \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ として α_e を求めると鍍が 0.2 mm で 2,198 ~ 3,030 W/m²K, 0.5 mm で 1,058 ~ 1,220 W/m²K となる。このように鍍の付着により有効熱伝達係数は大きく低下することがわかる。このことから軟鋼の焼入れ時の場合に高温側で熱伝達係数が低くなったのは鍍の影響と考えられる。なお表面に付着した鍍は冷却中にはく離するため実際の熱伝達係数はこの値より大きくなったものと考えられる。

10 Ni-8 Co 鋼の焼入れ熱処理の場合, Fig. 6 と Fig. 8 からわかるように目標の 0.5°C/sec 以上の冷却速度は容易に得ることができる。また全球殻状態でも, 内部に生ずる水蒸気をうまく外部に放出させることにより, 半球殻状態と同じ冷却速度を得ることができる。

最も重要な焼もどし熱処理についても温度管理を十分行うことにより, 505 ± 10°C の精度を全球殻状態で維持することができた。

これらの試験結果より, 半球殻ならびに全球殻状態のいずれでも, 6,000 m 深海潜水調査船の耐压球殻の調質熱処理が可能であることが明らかになった。

7 結 言

深海潜水調査船の耐压殻の調質熱処理を確立するために, 内径 2 m で板厚 80 mm の実物大球殻模型を用い

て, 半球殻と全球殻の熱処理試験を行った。得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 半球殻ならびに全球殻のいずれの条件でも, 10 Ni-8 Co 鋼焼入れ熱処理時の 700 ~ 400°C の平均冷却速度は約 3°C/sec であり, 目標値の 0.5°C/sec を十分満足できる。

(2) 全球殻で焼もどし熱処理を行う場合でも, 保持温度は 505 ± 10°C に維持することができ, 10 Ni-8 Co 鋼の熱処理条件を満足できる。

(3) 全球殻状態で焼入れ焼もどしの熱処理を施した 10 Ni-8 Co 鋼母材ならびに電子ビーム溶接部の機械的性質は, 0.2% 耐力が 126 kgf/mm² 以上, 0°C におけるシャルピー吸収エネルギーは 16 kgf·m 以上と良好な値であった。

(4) 全球殻で焼入れ焼もどしの熱処理を行う場合, 工作上問題となる大きな変形は生ぜず, 変形防止治具により形状保持が可能である。

参 考 文 献

- 1) 横田公男, 他: 2,000 m 潜水調査船“しんかい 2000”, 三菱重工技報, Vol.18, No.3 (1981).
- 2) 下山仁一, 他: 深海潜水調査船耐压殻の溶接工作法に関する研究, 三菱重工技報, Vol.13, No.4 (1976).
- 3) 遠藤倫正, 他: 電子ビーム溶接の深海潜水船耐压殻への適用の研究, 日本造船学会論文集, 第149号 (1981).
- 4) 遠藤倫正, 他: 深海潜水調査船の耐压殻の設計および製作, 日本造船学会論文集, 第148号 (1980).
- 5) 金沢正午, 他: 6,000 m 深海調査船用 10 Ni-8 Co 鋼の特性, 製鉄研究, 第284号 (1975).
- 6) C. J. Smithells: Metals Reference Book, 5th Edition Butterworths, 1976.
- 7) 山口富夫, 他: 熱処理時における鋼材の冷却速度の研究, 三菱重工技報, Vol.6, No.1 (1969).
- 8) P. J. Schneider: Temperature Response Chart, John Wiley and Sons (1963).
- 9) J. W. Mellor: Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, Vol. XIII Fe (Part 2).