

(昭和 56 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

深海潜水船耐圧殻の熱間曲げ加工と 熱処理法の研究

正員 山田 桑太郎* 正員 武田 俊一**
 正員 隆杉 憲行*** 正員 猪野 一郎***
 正員 福永 功* 小林 信義****

Hot Forming and Heat Treatment Procedure of Spherical Pressure
 Hull for Deep Submersible Research Vehicle

by Sotaro Yamada*, *Member* Toshikatsu Takeda**, *Member*
 Noriyuki Takashugi***, *Member* Ichiro Ino***, *Member*
 Isao Fukunaga*, *Member* Nobuyoshi Kobayashi****

Summary

This paper describes the fundamental research of, and subsequent development of the fabrication techniques—hot forming and heat treatment procedures—used in the pressure hull of a Deep Submersible Research Vehicle (DSRV).

10Ni-8Co steel is selected for the pressure hull of DSRV to be operated under sea 6000m in depth, that is a double quenched and tempered (aged) ultra high strength steel with 0.2% proof stress above 120kgf/mm². In the application of this material to the pressure hull with hot forming and heat treatment procedure, the most important and difficult aspect is the control of tempering (aging) temperature of a hemisphere component.

From this point of view, basic properties of this material and hot forming and heat treatment conditions effective for hemisphere fabrication are obtained from the fundamental research. To develop the fabrication techniques, a half scale model of a hemisphere is fabricated and tested with satisfactory results.

1 緒 言

深海潜水調査船は、その機能を十分に発揮するために自航式となるが、自航式潜水船においては、深度が増大するほど必要な PAY LOAD を確保することが技術上の焦点となっている。このため、形状的には重量/排水量 (W/D) 比の点で有利な単球殻構造が多く採用され、材料的には比強度 (強度/比重) が大きく、耐食性及びじん性の面でも所要の性能を満足する材料が選定される。

このような観点から、6000m 級深海潜水船の耐圧殻は単球殻構造とし、構造用材料としては、耐力 120kgf/mm² 級の 10Ni-8Co 鋼が最有力候補材となっている。

耐圧球殻は、熱間加工及び熱処理により半球殻に成形し、機械加工後に半球同士を接合して単球殻とする組立

て手順がとられる。一方、10Ni-8Co 鋼は、化学成分を適正に調整し、金属組織的には、焼入れによりマトリックスを強化するとともに、焼戻し時効による合金炭化物の析出硬化を利用して強度とじん性を保持した鋼材であり、従来の調質鋼に比べ、熱履歴に対する組織的な挙動が複雑となっている。

したがって、半球殻の製作に当っては、熱間加工と熱処理に伴う複雑な熱履歴に対する本鋼の適合性について十分検討し、実用的な加工条件と熱処理条件を選定しておく必要があるが、この点についての系統的な研究はほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、まず、10Ni-8Co 鋼の熱間曲げ加工性に関して基礎的検討を行い、これをもとに曲げ加工条件を決定した。次に、その後の熱処理条件の鋼材材質に及ぼす影響を調べて、所要の性能を確保するための熱処理条件を設定した。さらに、これらの基礎試験結果より選定した熱間曲げ加工と熱処理条件を適用して、実物大の約 1/2 縮尺模型半球殻を試作し、その有効性を立証した。

* 川崎重工業(株) 造船工作部

** 川崎重工業(株) 技術研究所 溶接研究室

*** 川崎重工業(株) 潜水艦設計部

**** 川崎重工業(株) 鉄構機器事業部

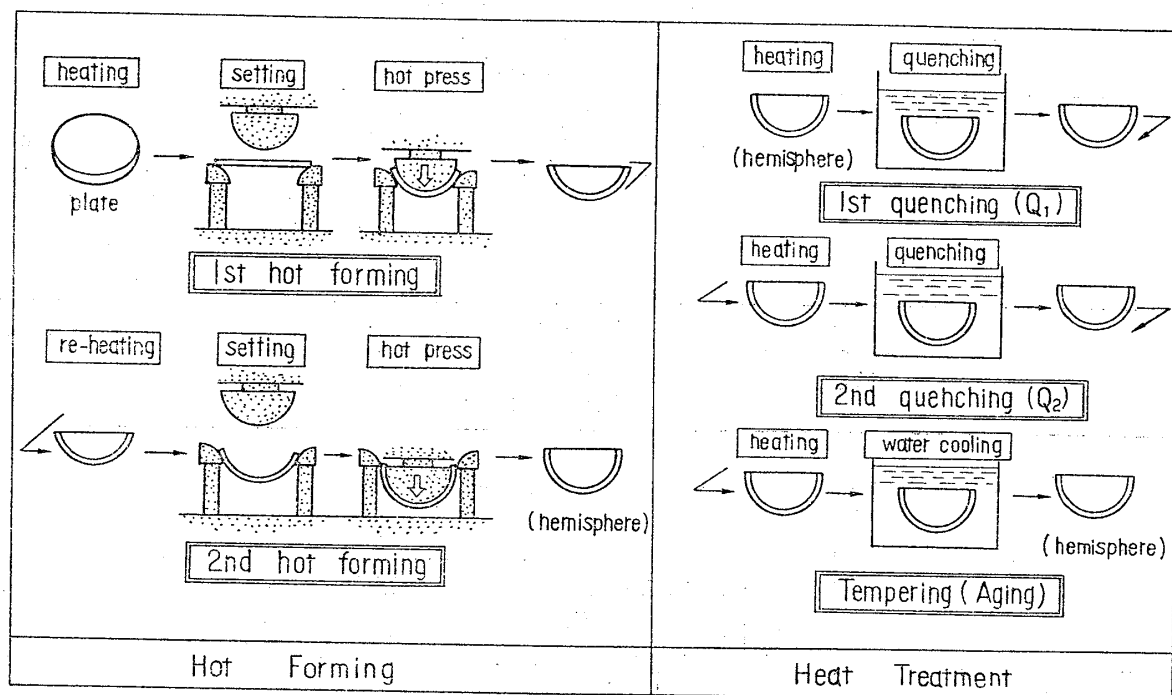


Fig. 1 Hot forming and heat treatment procedure of hemisphere

2 耐圧殻半球の熱間曲げ加工と熱処理法

球殻形状をした耐圧殻の組立て法としては、冷間曲げ加工及び溶接組立てによるセグメント方式と熱間曲げ加工及び熱処理による熱間半球一体曲げ加工方式の2通りがある。

しかし、深海潜水船耐圧殻の組立て法としては、溶接継手が少く、冶金的に均一な材料が得られること及び応力除去焼なましが必要で品質上の信頼性が高いことなどから、熱間半球一体曲げ加工方式で半球殻を製作することになると考えられる。特に、本研究で対象とした10Ni-8Co鋼は、焼戻し温度が低くかつ厳しく制限されている(510±5°C)ので、実質的に応力除去焼なましは不可能であり、熱間半球一体曲げ加工方式で半球殻を製作せざるを得ないと考えられる。

熱間曲げ加工と熱処理の概略手順をFig. 1に示す。

2.1 熱間曲げ加工法

熱間曲げ加工法としては、Hot pressとHot spinningの2つの方法があり、米国ではほとんどHot spinning法が採用されている¹⁾が、温度管理上、全体加熱を行うHot press法の方がよいといわれている²⁾こと、NS90鋼での実績及び既存設備の関係から、本研究ではHot press法による深絞り方式を採用した。

2.2 熱処理法

本研究で対象とした10Ni-8Co鋼は、高強度・高じん性の所要の性能を確保するため、NS90鋼の場合と同様、2段階焼入れと焼戻し(QQT)の熱処理が行われてい

る。しかし、両者における熱処理の目的と内容はTable 1に示すごとく、それぞれの工程において若干異なっている。

10Ni-8Co鋼は、焼戻し時に時効を兼ねたものとなっているので、焼戻し(時効)温度により性能が著しく変化することが知られている³⁾⁴⁾。このため、本鋼では、最適温度範囲が狭く、厳密な温度管理が必要であるといわれており、従来、半球殻の熱処理は困難であると考えられていた。

本研究では、NS90鋼製半球殻の熱処理実績をふまえて、本鋼についても、熱間曲げ加工後の熱処理として、基本的にはQQTの熱処理工程を採用することとし、種々の熱処理条件について検討を行った。また、熱間曲げ加工の影響を除去するために焼ならし(N)処理が必要かどうかについても合わせて検討を行った。

3 実験方法

本研究では、Table 2に示すごとく、熱間曲げ加工と熱処理条件に及ぼす各種要因について系統的な検討を行い、これをもとにそれぞれの適正条件範囲を選定した。さらに、半球殻を試作し、その妥当性を確認するとともに総合的な検討を行った。

3.1 熱間曲げ加工性試験

本項では、NS90鋼での曲げ加工実績を参考とし、まず10Ni-8Co鋼の高温での機械的性質を明らかにし、これをもとに曲げ加工条件範囲を決定した。次に、小型試験板(50, 100t×350□)を用いて、この条件範囲での熱

Table 1 Heat treatment properties of 10Ni-8Co and NS90 steels

鋼種	熱処理工程	1次焼入れ (Q_1)	2次焼入れ (Q_2)	焼戻し (T)
10Ni-8Co 鋼		合金元素及び圧延等で析出した炭化物等を十分に固溶させ、2次焼入れ時の結晶粒の微細化を促進させる。	高靱性を得るためにオーステナイト結晶粒を微細化させる。	時効により、合金炭化物を主として MoC を析出させ、材料を強化させるとともに、焼戻し効果により高靱性を得る。 [時効と焼戻し処理を兼ね] た dual heat treatment]
NS90 鋼		結晶粒を均一にし、2次焼入れ時の結晶粒の微細化を促進させる。	焼入れにより、マルテンサイト組織化し、材料を強化させる。また、結晶粒を微細化させる。	焼戻しにより高靱性を得る。

Table 2 Research items of hot forming and heat treatment in 10Ni-8Co steel

各種要因		熱間曲げ加工			熱 処 理						
		基特性	曲げ加工条件		焼ならし処理	焼入れ (Q_1, Q_2) 条件				焼戻し条件	
			高温強度	加熱温度		加工終了温度	加熱温度	保持時間	冷却速度	焼入れ温度	加熱温度
熱間曲げ加工性試験	加工性基礎試験 曲げ加工条件の影響	○	○	○							
熱処理性試験	焼ならし処理の検討			○	○						
	焼入れ条件の影響				○	○	○	○			
	焼戻し条件の影響 再熱処理の影響				○	○	○	○	○	○	○
半球殻試作試験			○	○	○	○	○	○	○	○	○

履歴に対する本鋼の材質特性を調査し、曲げ加工の基本条件を設定した。

なお、曲げ加工は、実際の工程に合わせて熱間プレスとし、試験板に熱電対を埋込み、加熱温度の制御と温度履歴の測定を行った。

3.2 熱処理性試験

本試験では、まず、10Ni-8Co 鋼の熱処理工程として、熱間曲げ加工の影響を除去するために焼ならし処理が必要かどうかについて検討を行った。

次に、本鋼の基本熱処理条件を選定することを目的として、半球殻焼入れ時の冷却方法にならう、加熱後、水槽中に水焼入れする方法で熱処理を行い、従来の熱処理特性との対比を行うとともに、焼入れ条件及び焼戻し条件に関する諸試験を実施した。また、本鋼の再熱処理が可能かどうかについても検討を行った。

なお、実験に当っては、試験板各部に熱電対を取付け、加熱温度の制御及び温度履歴、冷却速度等の測定を行った。

3.3 半球殻試作試験

基礎試験より選定した熱間曲げ加工及び熱処理条件の妥当性を確認するため、実物大耐圧殻の約 1/2 縮尺模型半球殻 (素材板厚 50 mm) を現有設備を用いて試作し、

その寸法形状の計測と確性試験板による材質試験及び解体試験を行った。

4 熱間曲げ加工性試験結果及びその検討

10Ni-8Co 鋼の高温引張試験結果を Fig. 2 に示す。

試験温度が 500°C 以上になると、強度的には急激に減少し、伸び及び絞りも逆に上昇し、800°C 以上ではそれぞれ約 10 kgf/mm² 以下、80% 以上となっている。

これより、熱間曲げ加工時の加工終了温度は、800°C 近傍での高温強度と伸びの変化から、安全側の 750°C 以上とした。

加工終了温度と強度・じん性との関係を Fig. 3 に示す。

なお、加熱条件は、NS90 鋼での実績から 1000°C × 1.5 hr ($t=50$ mm)、2.5 hr ($t=100$ mm) とし、曲げ加工後の熱処理条件は一定として試験を行った。

加工終了温度が低い場合には、強度的に若干低目の値が得られているが、本試験範囲内の曲げ加工条件下では、いずれも母材の要求性能 ($\sigma_{0.2} \geq 120$ kgf/mm², $vE_0 \geq 7.0$ kgf·m) を満足し、加工終了温度としては約 600°C でも特に問題ないことが知れる。

以上の結果より、10Ni-8Co 鋼の熱間曲げ加工が基本

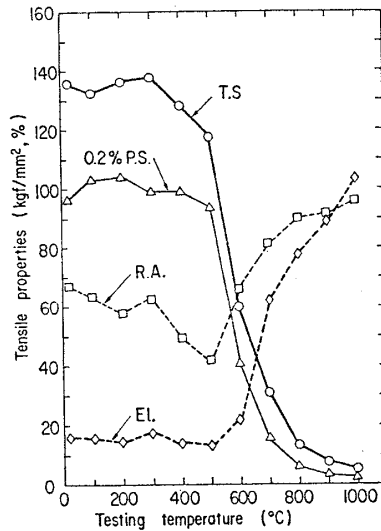


Fig. 2 Tensile properties of 10Ni-8Co steel at high temperature

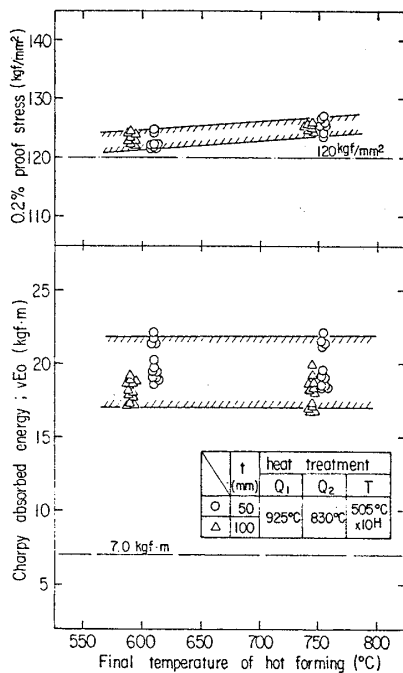


Fig. 3 Relation between final temperatures of hot forming and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

Table 3 Hot forming conditions of 10Ni-8Co steel

	温度条件	温度計測位置
加熱条件	1000±15°C×T*hr	鋼板の適当な位置 (板厚中心部)
加工終了温度	750°C以上	

注) *: T=1 (t≤1in)
T=1+(t-1)×0.5 (t>1in)

的に可能であることを確認した。また、本試験結果と NS90 鋼の実績から、耐割れ性及び成形加工の作業性を考慮して、熱間曲げ加工時の加工温度条件を選定すると Table 3 のごとくなる。

5 熱処理性試験結果及びその検討

5.1 焼ならし処理の検討

熱間曲げ加工後の焼ならし処理の影響に関する試験結果をまとめて Fig. 4 に示す。

なお、焼ならし温度は 950°C、冷却方法は空冷とし、その他の熱処理条件は一定とした。

本試験の結果では、焼ならしの有無による機械的性質の差異は特に認められず、いずれの場合も、0.2% 耐力で 120 kgf/mm² 以上、 vE_0 で約 17 kgf·m 以上の良好な結果が得られた。

これより、10Ni-8Co 鋼においては、曲げ加工履歴の影響を除去することを目的とした焼ならし処理は特に必要ないことが知れる。したがって、熱間曲げ加工後の熱処理としては QQT のみの工程を採用することにした。

5.2 焼入れ条件の影響

焼入れ加熱温度 (Q_1, Q_2) と強度・じん性との関係を従来データと比較して Fig. 5 に示す。

なお、本試験では、半球殻を加熱炉から水槽まで運搬するのに要する時間とそれに伴う温度降下 (NS90 鋼製半球殻熱処理時の実績は、所要時間約 3 分、温度降下約

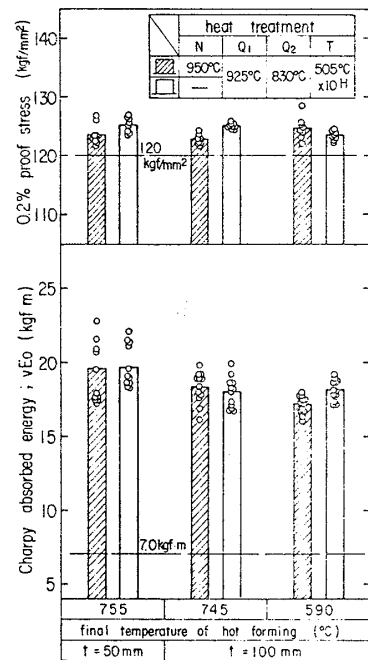


Fig. 4 Effect of final temperatures of hot forming and normalizing on mechanical properties of 10Ni-8Co steel

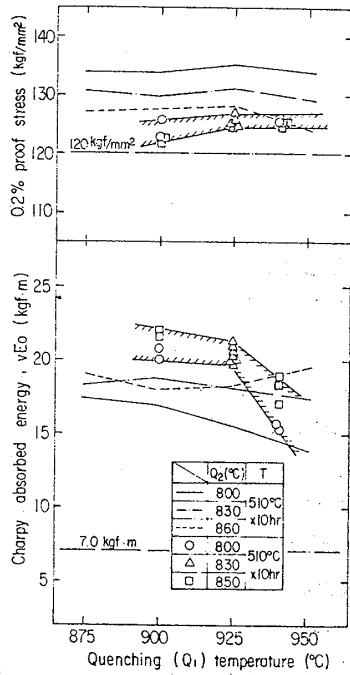


Fig. 5 Relation between quenching temperatures and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

50°C) を考慮して、焼入れ開始温度を加熱温度より約 50°C 低下した温度とした。

本試験の結果、Q₁ 温度としては、強度的には高い方が、じん性的には逆に低い方が良好な結果が得られ、一方、Q₂ 温度については逆の結果となっている。また、これらの結果を従来データと比較すると、強度的には若干低く、じん性的には逆に若干高目の値が得られてい

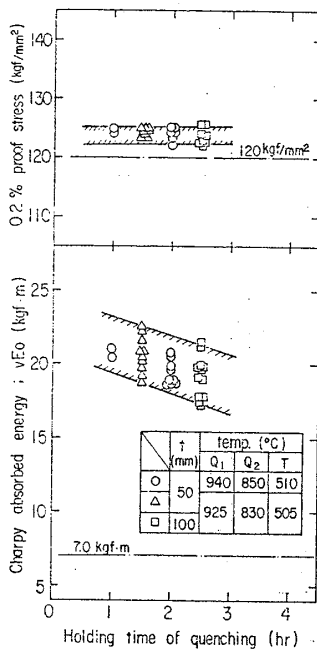


Fig. 6 Relation between holding time of quenching and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

る。さらに、焼入れ開始温度としては、加熱温度より約 50°C 低下しても性能上特に問題ないことを確認した。

以上の結果より、焼入れ加熱温度としては、強度及びじん性のいずれも良好な値が得られる Q₁=925°C, Q₂=830°C とするのが望ましいと考えられる。

焼入れ加熱保持時間と強度・じん性との関係を Fig. 6 に示す。

強度的には、保持時間の影響はほとんどみられず、ほぼ一定の値を示しているが、じん性的には、保持時間の増加とともに次第に低下しているのが知れる。これは、結晶粒の粗大化に起因するものと考えられる。

したがって、焼入れ加熱保持時間は、従来の鋼板の熱処理実績を考慮して“板厚 25 mm までは 1 時間、25 mm を超えるものは 25 mm につき 0.5 時間を加算した時間”とした。

次に、焼入れ時の冷却速度と強度・じん性との関係を従来データとともにまとめて Fig. 7 に示す。

本試験結果は従来データ³⁾と比較的良好一致を示し、本試験範囲内では焼入れ冷却速度の影響はほとんどみられず、強度及びじん性はいずれもほぼ一定の値となっている。また、組織的にもすべてマルテンサイト組織となっており、差異は認められなかった。

これより、10Ni-8Co 鋼は焼入れ性の非常に良い鋼材であり、焼入れ時の冷却速度としては、0.2°C/sec 以上であれば十分な性能を有するものが得られ、特に規定する必要はないと考えられる。

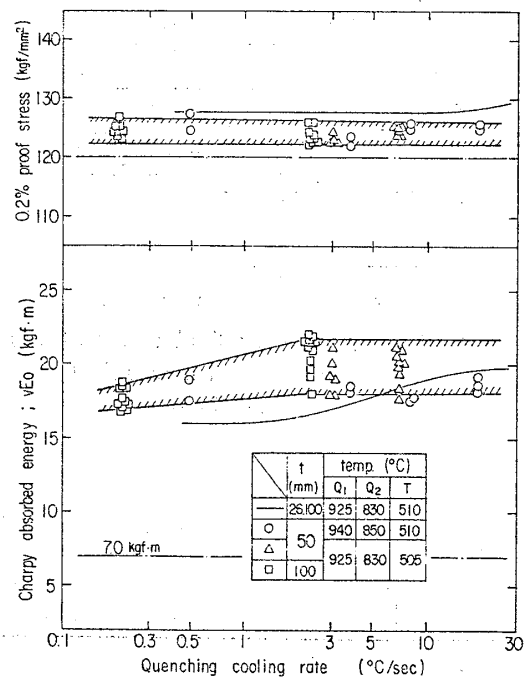


Fig. 7 Relation between quenching cooling rates and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

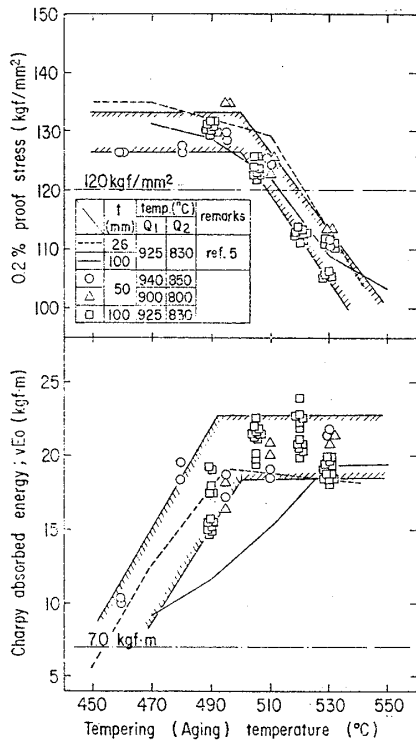


Fig. 8 Relation between tempering (aging) temperatures and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

5.3 焼戻し条件の影響

強度・じん性に及ぼす焼戻し（時効）温度の影響を従来データ⁵⁾と比較して Fig. 8 に示す。

本試験では、強度的には若干低く、じん性的には若干高目の値が得られているが、従来データとかなり良い対応を示しており、焼戻し温度 510°C までは、0.2% 耐力で 120 kgf/mm² 以上の値が得られている。一方、切欠じん性は 460~530°C の試験温度範囲でいずれも要求性能を満足し、500°C 以上では約 18 kgf·m 以上の良好な値となっている。

本試験の結果、10Ni-8Co 鋼の焼戻し温度としては、強度及びじん性的には 510°C 以下 480°C までは要求性能を十分満足する結果が得られている。しかし、一方、応力腐食割れ試験結果では、焼戻し温度が低いと K_{ISCC} 値が著しく低下することが知られている⁶⁾。

したがって、焼戻し温度条件は、加熱炉の設備能力及び半球殻各部における温度のバラツキ等を考慮して、従来の温度条件よりも低温側でかつバラツキ範囲を若干大きくして 505±7.5°C とした。

次に、強度・じん性と焼戻し（時効）保持時間との関係を従来データ⁵⁾と比較して Fig. 9 に示す。

本試験結果は従来データとほぼ同様の傾向を示し、5 時間以上の焼戻し時間で安定した強度・じん性が得られている。また、焼戻し時間による特性変化は焼戻し温度の影響にくらべて極めてゆるやかであることが知れる。

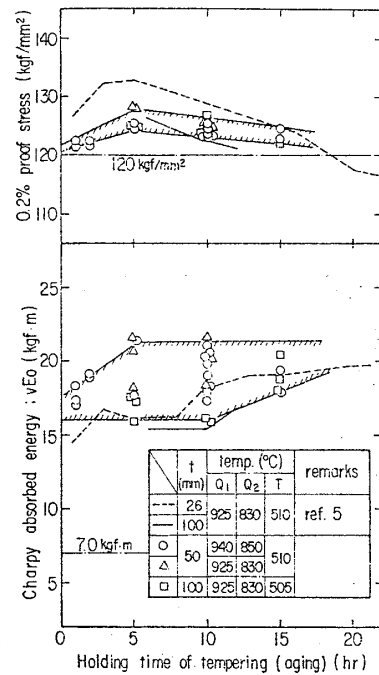


Fig. 9 Relation between holding times of tempering (aging) and mechanical properties of 10Ni-8Co steel

Table 4 Heat treatment conditions of 10Ni-8Co steel

	1次焼入れ (Q ₁)	2次焼入れ (Q ₂)	焼戻し (T)
加熱速度 (°C/hr)	≥150	≥150	75(300~450°C) 50(450~500°C)
加熱温度 (°C)	925±15	830±15	505±7.5
加熱保持時間(hr)	T*	T*	10
焼入れ開始温度 (°C)	≥875	≥780	—
焼入れ冷却速度** (°C/sec)	≥0.2	≥0.2	—(水冷)

注) *: $T=1(t \leq 1in)$, $T=1+(t-1) \times 0.5(t > 1in)$
 **: 冷却速度は、800°C または焼入れ開始温度から 500°C までの平均冷却速度（板厚中心部）を示す。

これらの結果より、焼戻し保持時間は、従来の実績条件にならい、安定した機械的性質の得られる 10 時間を選定した。

また、焼戻し時の冷却方法については、焼戻し脆性を防止するために水冷とした。

5.4 再熱処理の影響

以上の基礎試験結果をふまえて熱処理条件を選定すると Table 4 のごとくなる。

しかし、熱処理工程中に何らかの原因でこの標準条件を守れなかった場合及び熱処理後の性能確認試験で要求性能を満足しなかった場合には再熱処理が必要となる。

本項では、10Ni-8Co 鋼の再熱処理が可能であるかどうかを確認するために、1 回目熱処理後に標準条件で再

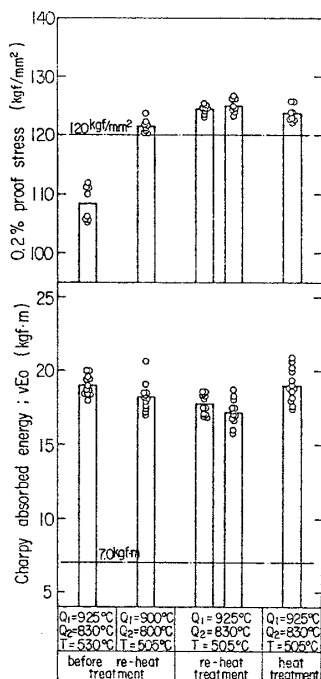


Fig. 10 Results of re-heat treatment test

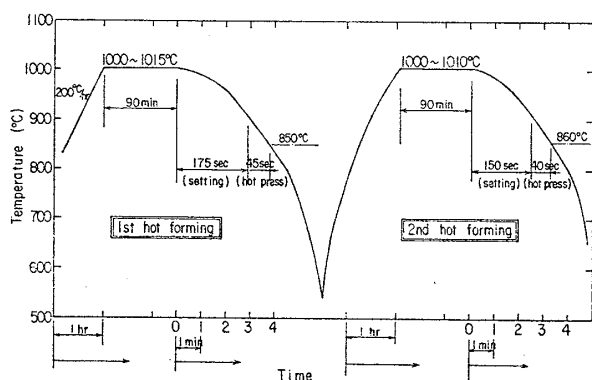


Fig. 11 Thermal history during hot forming of half-scale hemisphere

熱処理を行い、それぞれについて性能を調査した。

本試験結果をまとめて Fig. 10 に示す。

これより、標準条件にて再熱処理を行うことにより、1 回目の熱履歴にかかわらず満足すべき性能が得られることが知れ、本鋼の再熱処理が可能であることを確認した。

なお、再熱処理は、熱処理工程途中及び熱処理後にかかわらず、いずれの場合も 1 次焼入れ (Q₁) から施工することとし、再熱処理条件は Table 4 の標準条件をそのまま採用することにした。

6 半球殻試作試験

基礎試験より選定した熱間曲げ加工及び熱処理条件の妥当性を確認するとともに、各種要因を総合的に検討することを目的として、実物大半球殻の約 1/2 縮尺模型に相当する 1.38 mφ 半球殻 (素材板厚 50 mm) を現有設備を用いて試作し、半球殻各部の性能調査を行った。

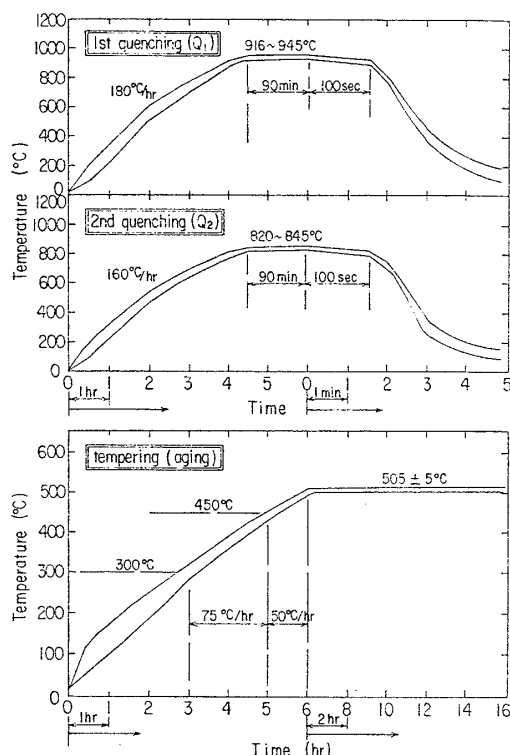


Fig. 12 Thermal history during heat treatment of half-scale hemisphere

6.1 熱間曲げ加工

熱間曲げ加工法は、プレスによる深絞り方式で、2 段階曲げ (荒曲げ及び仕上げ曲げ) 加工法を採用した。さらに、曲げ加工時の鋼板の温度降下を緩和する目的で金型を 200°C 以上に予熱した。

熱間曲げ加工時の鋼板温度計測結果を Fig. 11 に示す。荒曲げ及び仕上げ曲げ加工時の加工終了温度はいずれも 850°C 以上であり、Table 3 に示す加工温度条件を満足するものであった。

加工後、半球の内外面について表面検査を行った結果では割れ等の欠陥は全く認められず、また、形状及び板厚計測結果でも所定の目標精度を満足する良好な結果が得られた。

以上の結果より、10Ni-8Co 鋼製半球殻の熱間曲げ加工が設定条件内で十分可能であることを確認した。

6.2 熱処理

熱処理時の半球殻各部の温度計測結果をまとめて Table 5 及び Fig. 12 に示す。

Q₁Q₂T の各熱処理工程において Table 4 に示す標準熱処理条件を満足する結果が得られ、特に温度条件の厳しい焼戻し処理においても設定条件を上回る結果 (505 ± 5°C) となっている。

また、熱処理後の表面検査、形状及び板厚計測結果はいずれも良好で、欠陥は全く検出されず、形状精度も目標値を満足するものであった。

これらの結果より、設定条件内での半球殻の熱処理に

Table 5 Heat treatment results of half-scale hemisphere

	設定加熱条件		測定位置	測定結果			
	加熱温度 (°C)	保持時間 (hr)		加熱温度 (°C)	焼入れ開始 温度(°C)	焼入れ時の温 度降下(°C)	冷却速度 (°C/sec)
Q ₁	925±15	1.5	1/2t (6点) 表面 (12点)	910~930	880~910	20~40	6.0~7.8
				925~945	840~875	55~90	—
Q ₂	830±15	1.5	1/2t (6点) 表面 (12点)	820~845	800~820	15~30	6.3~7.8
				830~845	750~770	60~95	—
T	505±7.5	10	1/2t (6点) 表面 (12点)	500~510	480~500	10~20	—
				500~510	470~480	20~30	—

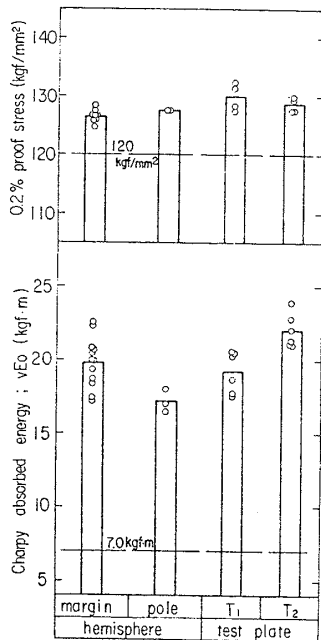


Fig. 13 Performance test results of half-scale hemisphere and test plates

ついても、現有設備を用いて十分施工可能であることを確認した。

6.3 性能確認試験

試作した半球殻の性能を確認するために、熱処理完了後、半球殻余長部に取り付けた確性試験板及び半球殻の余長部と頂部からそれぞれ試験片を採取し、性能確認試験を実施した。

引張及びシャルピー試験結果をまとめて Fig. 13 に示す。

本試験の結果、確性試験板と半球殻本体の各部とで、機械的性質には特に差異が認められず、いずれも 0.2% 耐力で約 125 kgf/mm² 以上、 vE_0 でも約 17 kgf·m 以上と良好な結果が得られている。なお、Fig. 14 に示す

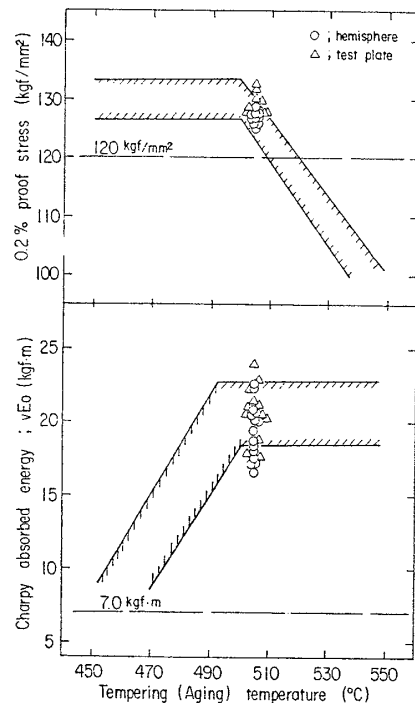


Fig. 14 Relation between mechanical properties of half-scale hemisphere and tempering (aging) temperature

ごとく、基礎試験より得られた焼戻し（時効）温度と強度・じん性との関係図に本試験結果をプロットすると、ほぼ推定通りの性能が得られていることが知れる。

また、Fig. 15 に示すごとく、硬さと降伏応力（耐力）の間には密接な関係が認められ、10Ni-8Co 鋼において 120 kgf/mm² 以上の耐力を確保するためには 390 Hv 以上の硬さを必要とすることが知れる。なお、確性試験板及び半球殻本体各部の硬さはそれぞれ 440~470 Hv 及び 420~460 Hv とほぼ一定の硬さ分布を示し、いずれも 390 Hv を上回る値であった。

以上の結果より、半球殻は強度・じん性とも所要の性

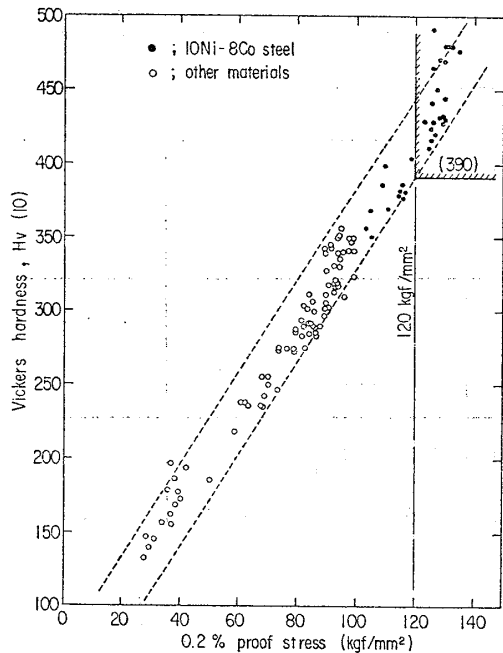


Fig. 15 Relation between Vickers hardness and 0.2% proof stress

能を上回るものであり、10Ni-8Co 鋼の熱間曲げ加工と熱処理が技術的に十分可能であることを確認した。また、確性試験板による機械試験及び硬さの測定を行うことにより、半球殻本体の性能が推定でき、これらが半球殻製作時の品質保証の方法として極めて有効であることを確認した。

7 結 論

6,000 m 級深海潜水船の耐圧殻用材料として最有力視されている 10Ni-8Co 鋼について、半球殻製作時の複雑な熱履歴を考慮して、熱間曲げ加工と熱処理に関する基礎試験及び半球殻の試作試験を行った。

本試験結果をまとめると以下のごとくなる。

- (1) 10Ni-8Co 鋼の熱間曲げ加工と熱処理に関する基礎試験結果より、本鋼の熱間半球一体曲げ加工法が基本的に可能であることを確認するとともに、その実用的な基本条件を選定した。

また、本鋼材では、熱間曲げ加工後に焼ならし処理を行う必要性は特に認められず、また再熱処理が可能であることを示した。

- (2) 半球殻試作試験の結果、設定条件内での熱間曲げ加工と熱処理が技術的に可能であり、半球殻は強度・じん性とも十分満足すべき性能を有するものであった。

また半球殻製作時の品質保証の方法として、確性試験板による機械試験及び硬さの測定が極めて有効であることを示した。

以上の結果より、本研究で検討を行った 10Ni-8Co 鋼を用いて、6,000 m 級深海潜水船の建造に熱間半球一体曲げ加工方式を適用することが可能であることを実証でき、かつその基本施工法を確立し得たと考える。

おわりに、本研究の遂行に当り、吉識名誉教授には絶大な御支援と御指導を頂いた。また、試験実施上、新日本製鉄(株)の関係者各位及び岩村吉就氏(元川崎重工業溶接研究室研究員)には多大なる御協力を頂いた。記して、深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) C. Garland : Design and Fabrication of Deep-Diving Submersible Pressure Hulls, SNAME, Vol.76 (1968), 161.
- 2) R. J. Wolfe : Titanium Fabrication for Pressure Hulls of Deep Diving Submersibles, MTSJ, Vol.3, No.6 (1969), 41.
- 3) 金沢, 中島, 他 : 6,000 m 深海調査船用 10Ni-8Co 鋼の特性, 製鉄研究, No.284 (1975), 11.
- 4) 金沢, 森川 : 10Ni-8Co 超高張力鋼の強化機構とその特性—6,000 m 深海調査用厚鋼板—, 日本金属学会報, Vol.14, No.3 (1975), 195.
- 5) 深海潜水調査船に関する調査研究, 海洋科学技術センター研究報告書, 昭和 50 年 11 月.
- 6) 山田, 他 : 深海潜水船耐圧殻材料の応力腐食割れの研究, 日本造船学会論文集, 第 150 号 (1981), 本誌.