
SA 508 Class 4 鍛鋼品の製造

Manufacture of SA 508 Class 4 Steel Forgings

戸部 俊一(Toshikazu Tobe) 谷 豪文(Hidefumi Tani) 松居 進(Susumu Matsui) 狩野 征明(Seimei Karino)

要旨：

SA 508 Class4 として規定される常温で使用される高圧水槽鍛鋼品を製造し納入した。この鍛鋼品はすぐれた機械的性質を有し、かつ溶接後熱処理による靱性劣化も生じないものであった。さらに熱もどし脆化温度域での使用に対処するため低 Si 化を検討した結果、Si の 0.25%～0.03%への低減はステップクーリングによる脆化後の靱性値を vTs として 35～40℃改善するが、強度 3～4kgf/mm² 低下させることがわかった。Si 低減による強度の低下を C および Ni の増量で補償した 400mm 肉厚の鍛造品を試作した結果、強度規格を満足し、かつステッククーリングによる脆化後の靱性の良好な SA508 Class4 鍛鋼品の製造が可能であることが確認できた。

Synopsis：

The forgings specified as SA 508 Class 4 for the high pressure water tank have been manufactured and delivered, which have good mechanical properties and are free of embrittlement by simulated post-weld heat treatment. An investigation has been made for reducing the silicon content, so that this steel can be used at high temperature which will embrittle this steel. Consequently, it has been clarified that reducing the silicon content from 0.25% to 0.03% improves the toughness after embrittling by step cooling as dropping by 35 to 45℃ of vTs , but decreases the strength by 3 to 4 kgf/mm². The experimental low silicon content forgings whose drop in strength was compensated by increasing carbon and nickel contents have satisfied the strength requirements and show good toughness after embrittling by step cooling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

SA 508 Class 4 鍛鋼品の製造

Manufacture of SA 508 Class 4 Steel Forgings

戸 部 俊 一*

Toshikazu Tobe

谷 豪 文**

Hidefumi Tani

松 居 進***

Susumu Matsui

狩 野 征 明***

Seimei Karino

Synopsis:

The forgings specified as SA 508 Class 4 for the high pressure water tank have been manufactured and delivered, which have good mechanical properties and are free of embrittlement by simulated post-weld heat treatment.

An investigation has been made for reducing the silicon content, so that this steel can be used at high temperature which will embrittle this steel. Consequently, it has been clarified that reducing the silicon content from 0.25% to 0.03% improves the toughness after embrittling by step cooling as dropping by 35 to 45°C of T_s , but decreases the strength by 3 to 4 kgf/mm².

The experimental low silicon content forgings whose drop in strength was compensated by increasing carbon and nickel contents have satisfied the strength requirements and show good toughness after embrittling by step cooling.

1. 緒 言

ASME SA 508 Class 4 として規定される $3\frac{1}{2}\text{Ni}-1\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$ 鍛鋼材はすぐれた焼入れ性を有し、高強度かつ高靱性を要求される極厚の圧力容器材として注目されている。しかし高Ni、高Cr含有であるため焼もどし脆化感受性が高く、溶接後熱処理(PWHT)後の冷却あるいは中高温度での使用による靱性の劣化が問題となるため実機として製造された例はあまり無い。

当社では海底ケーブル耐圧試験用高压水槽部材として当鋼を受注、製造した。製品に確性試験用として余長を付け試験を行ったところ極めてすぐれた鍛鋼品であることが確認された。

高压水槽の場合はその使用温度が常温であるため、靱性劣化の要因としてはPWHT条件のみを考慮すればよいが、最近当鋼の採用が検討されてい

る化学工業用リアクターあるいは石炭液化用高压容器等、中高温度での使用に供される場合については使用中の脆化を考慮しなければならない。またASMEでは当鋼に関する Supplementary Requirementsとして真空カーボン脱酸を指定された場合はSiの含有量を0.12%以下に規定している脆化および製鋼方法の指定に対処するため、当鋼におけるSiの効果を把握しておくことは当鋼の用途拡大を図るために重要である。そこで低Si系とした場合の材料特性について実機相当の確性試験材を製作し調査した結果、上記要求にも十分対応できることが確認できた。

2. 実機の製造と確性試験

2.1 実機の製造

今回受注し、製造した海底ケーブル耐圧試験用

* 水島製鉄所鋳鍛部鋳鍛管理室主任(掛長待遇)

** 水島製鉄所鋳鍛部鋳鍛管理室

*** 技術研究所水島研究室主任研究員

(昭和55年11月26日原稿受付)

高圧水槽部材であるシェル材の形状を Fig. 1 に示す。また SA 508 Class 4 に要求される化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。

転炉-LRF (Ladle Refining Furnace) プロセスにより得られた溶鋼を無酸化下注法により 60 t 鋼塊に造塊した。溶鋼分析結果を Table 2 に示す。

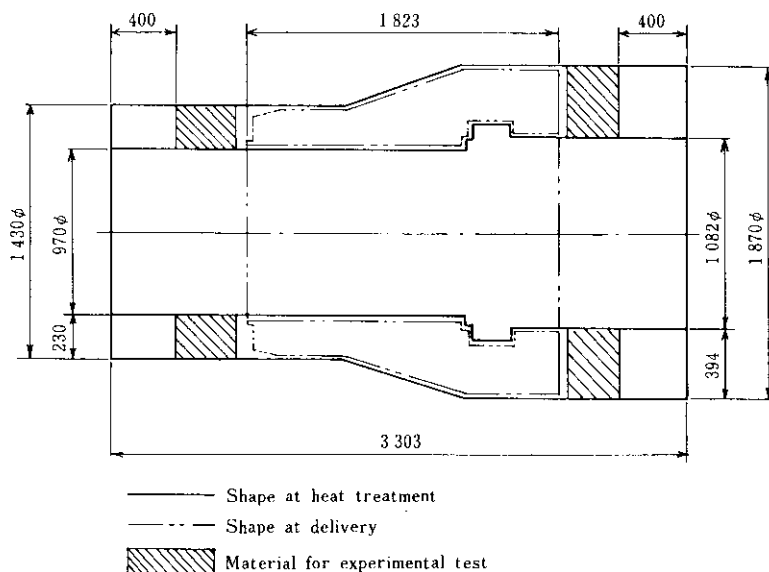


Fig. 1 Shape at heat treatment and delivery of the shell for the high pressure water tank

Table 1 Requirements for SA 508 Class 4

Chemical requirements								(%)
C	Si *	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Max. 0.23	0.15 ~0.40	0.20 ~0.40	Max. 0.020	Max. 0.020	2.75 ~3.90	1.50 ~2.00	0.40 ~0.60	Max. 0.03
Mechanical requirements								
Tensile properties					Charpy impact properties			
Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation in 50mm (%)	Reduction of area (%)		Absorbed energy at -29°C (kgf·m)			
Min. 59.8	73.8 ~91.4	Min. 18	Min. 45		Mean value : Min. 4.8 Each value : Min. 4.1			

Note * For the material with vacuum carbon dioxided, the silicon content shall be 0.12 % max.

Table 2 Ladle analysis of the steel for the shell forging

(%)											
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
0.16	0.24	0.26	0.006	0.002	3.09	1.65	0.49	0.006	0.001	0.001 max.	0.0004

化学成分の設定にあたっては規格範囲の比較的狭いSi, Mn およびMoについては範囲の中央値をねらい, Cについては強度と靱性の面から0.16%, Ni およびCrについては溶接性を考慮して規格範囲の低目を目指し, Vは無添加とした。またPWHTによる脆化抑制を目的としてP, Sn, Sb およびAsを低くするため転炉における100%溶銑操業およびダブルスラグ法を採用した結果, 次式で計算される不純物元素パラメータ $\bar{X}$ に換算すると6.7という低いレベルが達成された。

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^{-2}$$

シェル材の鍛造プロセスをFig. 2に示す。鍛造後組織の均一化を目的として焼ならしー焼もどしを予備熱処理として行った後, Fig. 1の形状に荒削りし調質(焼入れー焼もどし)に供した。860°C

に8h保持し均一にオーステナイト化した後水中に焼入れし, 続いて615°Cに12h保持し焼もどしを行った。なお焼もどし後の冷却は水冷とした。調質後, 機械加工により製品本体と確性試験材を切り離し, 確性試験材は以下の試験に供した。なお製品については納入前に超音波探傷および磁粉探傷を行ったが, いずれにおいても欠陥は全く検出されなかった。

2.2 確性試験結果

Fig. 1に示す供試材を用い, 引張試験, 衝撃試験および落重試験を行った。また機械的性質におよぼすPWHTの影響も調査した。なお調質前に供試部の表層下20mm, 肉厚の1/4部および肉厚中央部に熱電対を埋め込み焼入れ冷却速度を実測した。Table 3にその結果を示す。以下確性試験により得られた供試材各部のデータは焼入れ冷却速度との対応で示す。

Table 3 Actual cooling rate in quenching of the shell forging

Portion	Mean cooling rate from 800 to 400 °C (°C/min)
Surface of 394 mm thick	142
Quarter of 394 mm thick	10.6
Center of 394 mm thick	8.5
Surface of 230 mm thick	160
Quarter of 230 mm thick	27
Center of 230 mm thick	23

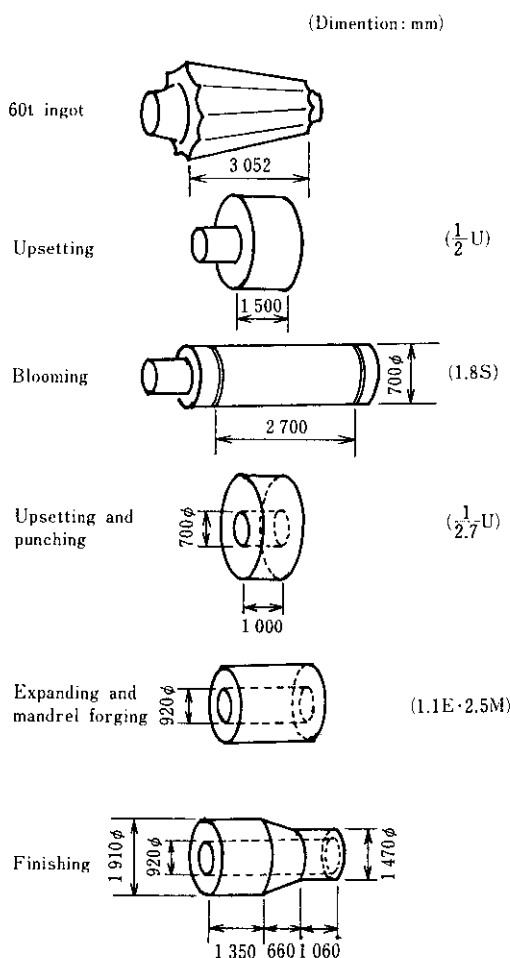


Fig. 2 Forging process of the shell

供試材各部の引張特性を冷却速度で整理するとFig. 3が得られる。同じくVノッチシャルピー衝撃試験における破面遷移温度(vTs)およびNRL落重試験におけるNDT温度(T_{NDT})についてはFig. 4が得られる。強度, 靱性ともに焼入れ冷却速度に依存し, 冷却速度の速いほど高強度, 高靱性を示すが, もっとも冷却速度の違い394mm肉厚中央部でも強度は規格値を満足し, vTs , T_{NDT} ともに良好な値を示している。

Fig. 5およびFig. 6はPWHT温度および時間の強度および靱性におよぼす影響を394mm肉厚の1/4部について調査した結果を示す。PWHT温度およ

び時間は、次式で計算される焼もどしパラメータ (P_T) と相関があり、 P_T を増大させると強度は低下する。

$$P_T = T (20 + \log t) \times 10^{-3}$$

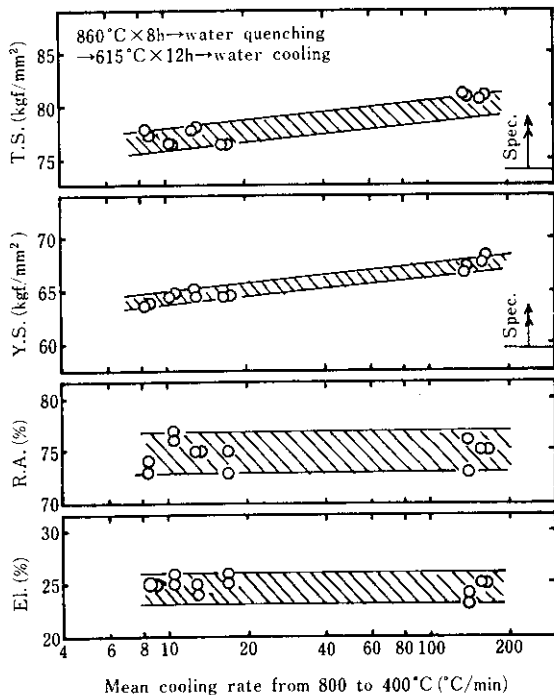


Fig. 3 Changes in tensile properties with cooling rate in quenching the shell

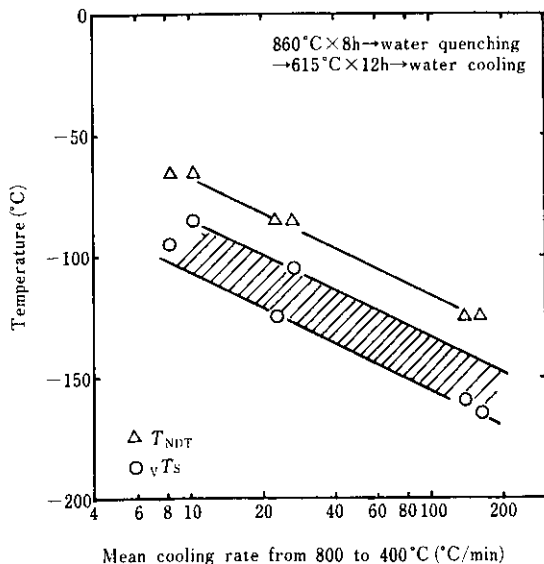


Fig. 4 Changes in toughness with cooling rate in quenching the shell

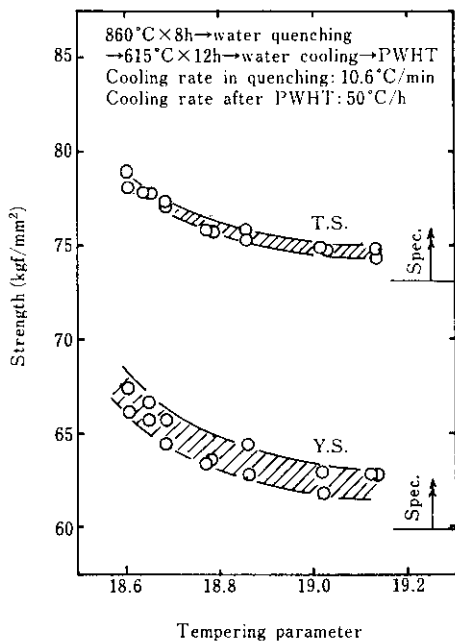


Fig. 5 Influence on shell strength of total tempering parameter calculated by PWHT temperature and holding time

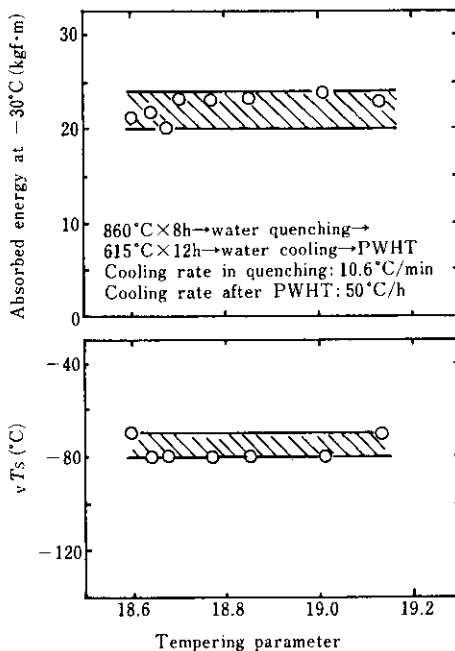


Fig. 6 Influence of total tempering parameter calculated by PWHT temperature and holding time on V-notch Charpy impact properties of the shell

ここで T は温度 (K), t は時間 (h) である。しかし靱性に対しては調査の水準内ではほとんどその影響は認められない。

次にPWHT後の冷却速度の靱性におよぼす影響を394mm肉厚1/4部および230mm肉厚1/4部について調査した結果を Fig. 7 に示す。試験の範囲内では顕著な傾向は認められない。Fig. 8 に材料をPWHT温度から空冷した場合の板厚と冷却速度の関係を示すが、これから今回製造したシェル材のPWHT後の冷却速度を推定すると約60°C/hとなり、Fig. 7 から靱性劣化の懸念はない。

以上の結果今回製造した高圧水槽用シェル材は製品各部すべてについて要求性能を満足するものであり、これらの母材性能はPWHT後でも維持されるものであることが確認された。これはP, Sn, Sb, As等の不純物元素を抑え、合金成分の含有量を適正に設定したことによるものと考えられる。

3. 材料特性におよぼすSiの影響

上記高圧水槽用部材のように常温で使用される鍛鋼品についての脆化はPWHT条件のみを考慮す

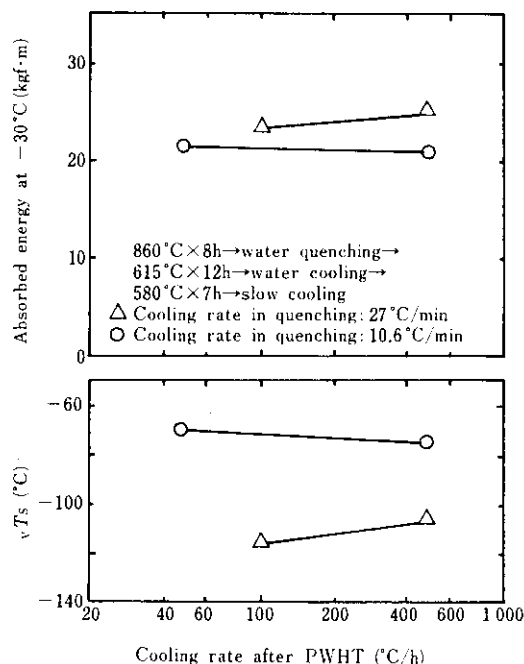


Fig. 7 Influence of cooling rate after PWHT on V-notch Charpy impact properties of the shell

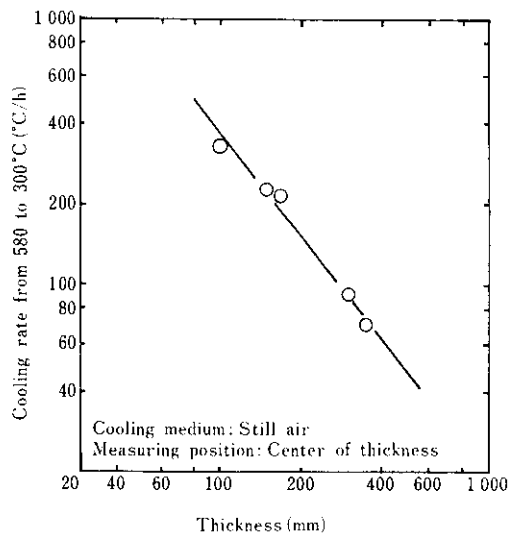


Fig. 8 Relation between plate thickness and cooling rate after PWHT when cooled in still air

ればよく、これについてはP, Sn, Sb, As等の不純物元素を少なくすることにより防止できることは実機の製造で明らかとなった。しかしその使用温度が中高温域となる場合はより厳しい焼もどし脆化対策が必要となる。

焼もどし脆化に関しては前記不純物元素のほかSiおよびMnが脆化元素として知られている¹⁾。SA 508 Class 4の成分規格 (Table 1参照)において、Mnはその規格範囲が狭く調整代がほとんど無いが、Siについては真空カーボン脱酸を考慮すれば0~40%の範囲で調整が可能である。また逆に脱酸方法として真空カーボン脱酸を指定された場合を想定すれば、Si含有量の影響を調査しておくことは当鋼の適用範囲の拡大にとって重要である。そこで低Si鋼と通常Si鋼との材料特性について比較調査を行った。

3.1 実験方法

Table 4に示すSi含有量のみが異なり、他の成分についてはほぼ同一である2鋼種の50kg鋼塊を高周波真空溶解炉で溶かし、熱間鍛造により供試材を得た。

シミュレーション熱処理により、焼入れ-焼もどしおよび脆化処理を施し、強度および靱性について比較調査を行った。なお焼入れのためのオーステナイト化は860°C×2hとし、焼入れ冷却速度

Table 4 Chemical composition of the materials for simulation test

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Si added	0.16	0.25	0.28	0.005	0.002	3.10	1.63	0.50	0.005
Si less	0.16	0.03	0.26	0.006	0.002	3.08	1.65	0.48	0.006

(%)

を 5°C/min および 20°C/min の 2 水準に変化させた。5°C/min は 500mm 肉厚中心の水冷時冷却速度、20°C/min は 250mm 肉厚中心の水冷時冷却速度に相当する。また焼もどしは 595、615 および 635°C の 3 水準の温度とし、保持時間はいずれも 8 h とした。脆化処理は GE 標準タイプのステップクーリングとした。

3.2 実験結果

引張試験結果を Fig. 9 に示す。引張強さ、降伏

強さともに焼入れ冷却速度の低下あるいは焼もどし温度の上昇にともない低下する。この傾向は Si 添加、無添加によらず同様であるが、同一熱処理条件で強度を比較すると Si 無添加鋼は添加鋼に比べ引張強さ、降伏強さともに 3 ~ 4 kgf/mm² 低く、615°C 以上の焼もどしでは規格を下まわっている。

Fig. 10 にステップクーリングによる脆化処理前後の V ノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。vTs は焼入れ冷却速度の増大により向上するが、焼もどし温度の影響はほとんど認められない。この傾

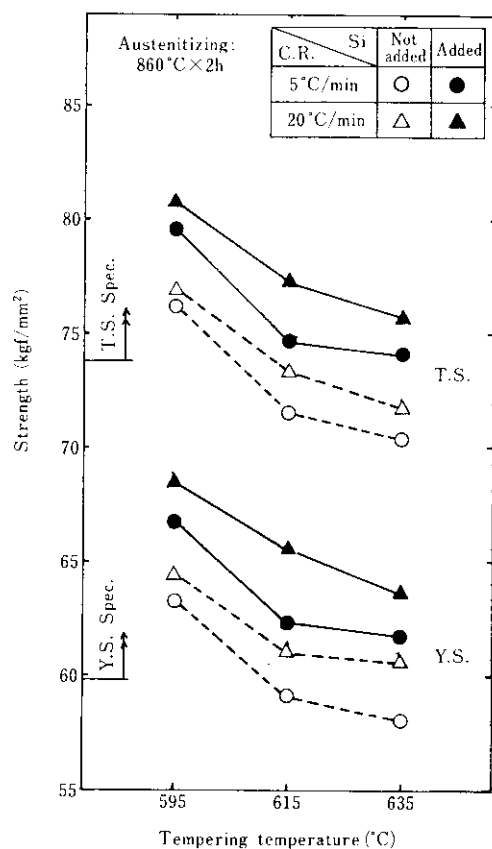


Fig. 9 Effect of silicon content on strength (Holding time at tempering temperature is 8h)

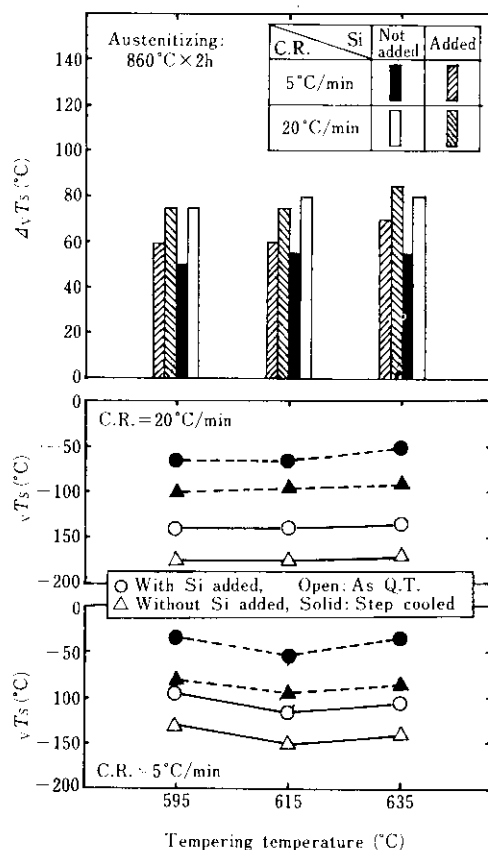


Fig. 10 Effect of silicon content on V-notch Charpy impact property (Holding time at tempering temperature is 8h)

向はSiの有無あるいは脆化処理の有無によらず同様である。同一熱処理条件ではSi無添加鋼の νT_s は添加鋼に比べ約35°C低くなっている。この差は脆化処理後においても同じである。Fig. 10にはステップクーリングによる脆化量も合わせて示すが、焼入れ冷却速度が20°C/minの場合Si量による差は認められないが、5°C/minの場合Si無添加鋼の方が添加鋼に比べ5~10°C少ない。しかしこの差は靱性値そのものについての差(35°C)に比べれば小さい。

以上よりSiの低減は初期靱性を向上させ、かつ脆化量を若干軽減するために、脆化後の靱性値向上に効果がある反面、強度を低下させることがわかった。

4. 低Si系実機相当材の試作

低Si化は脆化の軽減よりむしろ初期靱性の向上

により、脆化後でも安全な靱性値が得られるという効果をもつことが実験室的に確かめられた。そこで実機規模の低Si系鍛鋼品を試作し靱性試験を行うこととした。

真空溶解により5 t鋼塊を得、430 t×800 w×1 000 l (mm)に鍛造し、予備熱処理として焼ならしー焼もどしを行い、機械加工により厚みを400 mmに減厚した後調質処理に供した。試作材の化学成分および調質条件をTable 5に示す。低Si化による強度低下を補うため、高圧水槽用シェル材の成分に比べCを0.02%高くし、Niは規格範囲の上限ねらいとするため0.6%程度高くした。

Fig. 11に引張試験結果を示す。肉厚中心部でも規格を満足している。またFig. 12にはVノッチシャルピー衝撃試験結果を示すがいずれの部位についても高い靱性が得られている。

低Si系試作材は中高温度域使用を意図して製造したものであるため高温強度および焼もどし脆化特

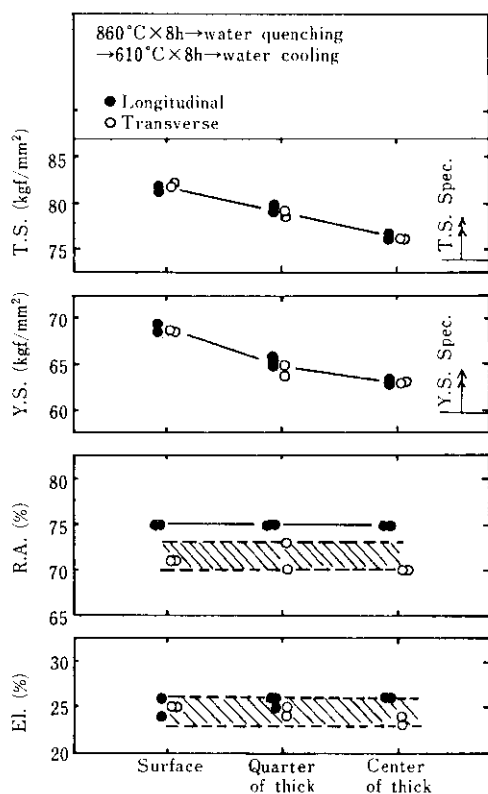


Fig. 11 Tensile properties of the experimental forging without silicon added

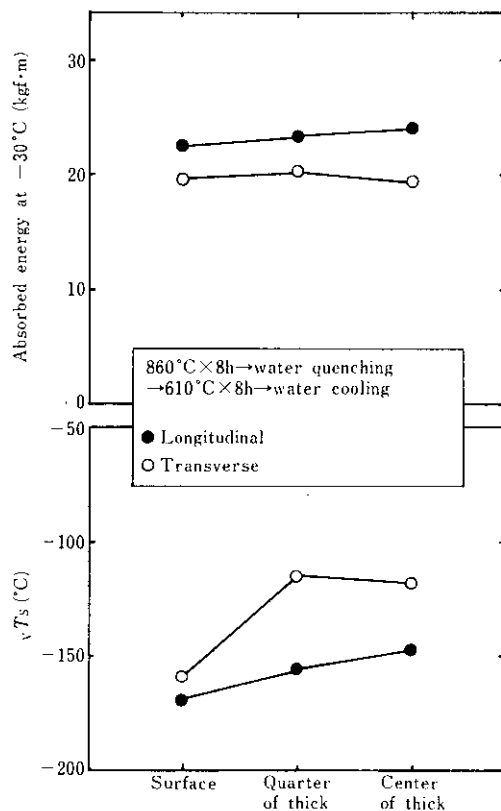


Fig. 12 V-notch Charpy impact properties of the experimental forging without silicon added

性を確認しておく必要がある。Fig. 13 は580°C×20hのPWHTを付加した後の高温引張試験結果を示す。いずれの温度においても降伏強さはASME CODE SECT. VIII Div. 2に規定される S_y 値以上の値となっている。

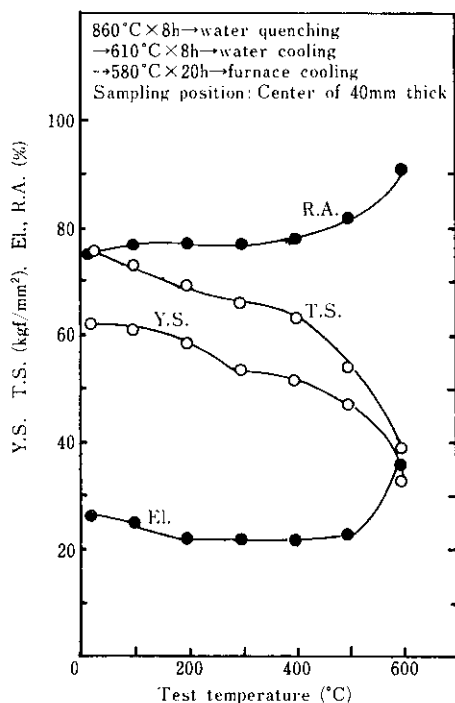


Fig. 13 Elevated temperature tensile properties after simulated PWHT for the experimental forging without silicon added

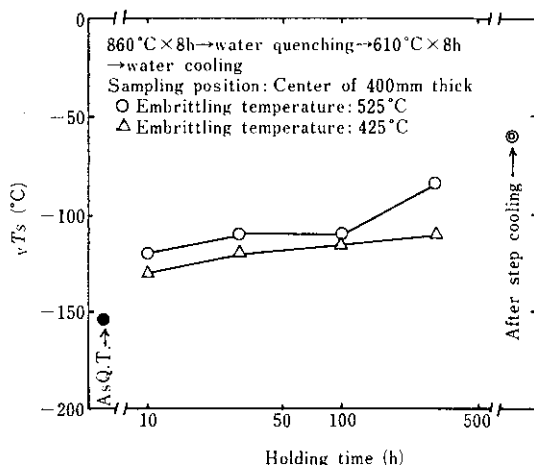


Fig. 14 Change in toughness of the experimental forging without silicon added by isothermal embrittling treatment and step cooling

Fig. 14は等温脆化処理およびステップクーリングによる加速脆化処理による靱性の変化を示すが、脆化後でも十分な靱性が維持されている。

低Si系試作材の性能レベルを客観的に評価するために先に製造した高压水槽用シェル材の性能と比較するとFig. 15が得られる。Fig. 15は焼入れ冷却速度で強度および靱性を比較したものである。なお、焼入れ冷却速度はいずれも実測値である。Fig. 15において強度については両鋼ともほぼ同一レベルとなっており低Si化による強度低下はCおよびNiの増量によりカバーできたものと考えられる。一方靱性についてはFig. 6あるいはFig. 10から焼もどしの影響はほとんど受けないと考えられ

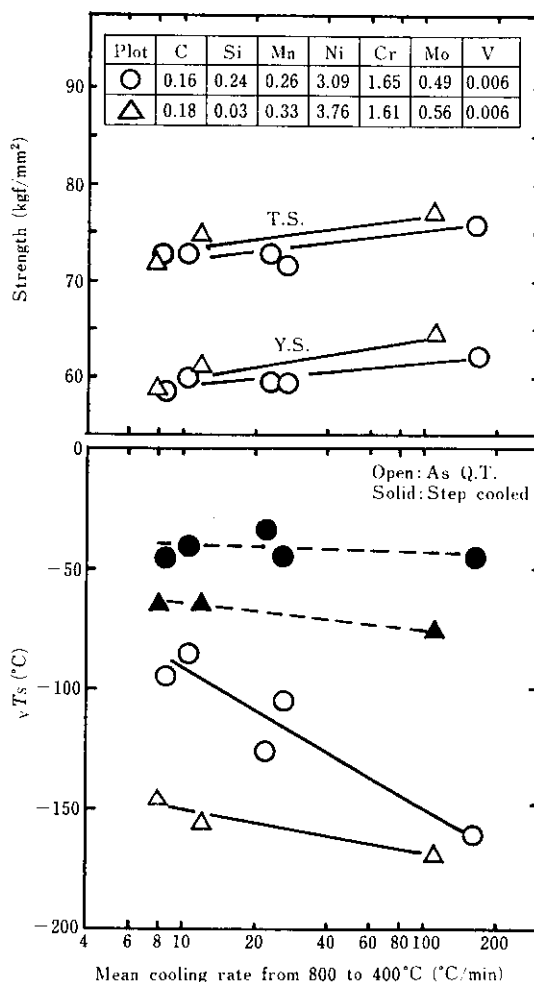


Fig. 15 Comparison about strength and toughness between 0.24% Si steel intended for the shell forging and 0.03% Si steel for the experimental forging

Table 5 Chemical composition and heat treatment of the experimental forging without silicon added

Chemical composition (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
	0.18	0.03	0.33	0.005	0.003	3.76	1.61	0.56	0.006	0.002	0.001 Max.	0.0004
Heat treatment	Quenching			860 °C × 8 h, Water quenching								
	Tempering			610 °C × 8 h, Water cooling								

るので Fig. 15 に示される靱性の差は化学成分の差とみなせる。靱性レベルおよびステップクーリングによる脆化量の焼入れ冷却速度依存傾向は両鋼で異なるが、これは低Si化による固溶硬化の低下とCおよびNiの増量による焼入性の向上とのバランスによるものと考えられる。いずれにしても脆化前、脆化後ともに低Si系試作材の方が良好な靱性を示している。

以上の試作結果から、中高温域で使用されても高強度、高靱性を維持できるSA 508 Class 4 鍛鋼材を製造できる見通しがたった。

5. 結 言

焼もどし脆化感受性が高いゆえに、その製造上の取扱いがむずかしいとされていたSA 508 Class 4 材を実機として製造し納入した。その材料性能はすぐれたものであり当初懸念されたPWHT後の冷却による靱性劣化も生じないものであることが確認された。

また当鋼の中高温域使用に対処するため焼もどし脆化感受性の低いと考えられた低Si系成分について実験室的にSiの効果を確認したうえ、低Si材で実機相当材を試作し確性試験を行った。その結果低Siでも合金元素の含有量を調整すれば高強度、高靱性で中高温域での使用にも耐え得る厚肉の鍛鋼品の製造が可能であることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 佐藤はか：川崎製鉄技報，12 (1980) 1, 91