
低 Si 系高低圧一体型タービンローターシャフト材の製造

Manufacture of Low Si Type HP-LP Single Turbine Rotor Shaft

飯田 義治(Yoshiharu Iida) 朝生 一夫(Kazuo Asoh) 和中 宏樹(Hiroshige Wanaka)
小石 想一(Soichi Koishi) 内田 清(Kiyoshi Uchida) 狩野 征明(Seimei Karino)
佐藤 信二(Shinji Sato) 中野 善文(Yoshifumi Nakano)

要旨：

タービンローター用高低圧 1 体軸は、多くの要求特性を満足する必要がある。すなわち高圧部においては、低い焼きもどし脆化感受性とすぐれた高温特性が要求され、低圧部では、すぐれた靱性と高強度が必要である。しかしながら同時にこれらの要求を満足させることは困難である。今回低 Si タイプの 2.9Ni-0.65 Cr-0.5 Mo-0.1v 鋼を適用し高低圧 1 体型ローターシャフトを製造した。各種基礎試験により得られた結果は以下のとおりである。(1) P, Sb, Sn, As と同時に Si を非常に低くした場合、ローターシャフトの、ステップクーリング処理による脆化はほとんどみられなかった。(2) 高 Si 鋼と、低 Si 鋼では、短時間高温強度で、若干の差はみられたが、クリープ破断強度では差は見られなかった。(3) 低 Si による 500°C 以下の温度での強度低下は、Cr の少量増加により補うことができた。

Synopsis：

An HP-LP single shaft for a turbine rotor must meet requirements such as low susceptibility to temper embrittlement, superior high-temperature properties in the HP portion, and good toughness and high tensile strength in the LP portion. It is, however, difficult to satisfy all of these requirements at the same time. The authors applied a low Si type 2.9Ni-0.6Cr-0.50Mo-0.1V steel to an HP-LP single shaft. The results obtained by some tests are as follows: (1) Since the Si content and impurities such as P, Sb, Sn and As were reduced to very low levels, the rotor shaft suffered from little embrittlement due to step-cooling. (2) Though the tensile strength at elevated temperatures was significantly affected by the Si content, the creep rupture strength was not affected. (3) The decrease in tensile strength at elevated temperatures below 500°C due to the reduction of Si content could be compensated by a small increase in Cr content.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

低 Si 系高低圧一体型タービンローターシャフト材の製造

Manufacture of Low Si Type HP-LP Single Turbine Rotor Shaft

飯田 義治*
Yoshiharu Iida

朝生 一夫**
Kazuo Asoh

和中 宏樹***
Hiroshige Wanaka

小石 想一****
Soichi Koishi

内田 清*****
Kiyoshi Uchida

狩野 征明*****
Seimei Karino

佐藤 信二*****
Shinji Sato

中野 善文*****
Yoshifumi Nakano

Synopsis:

An HP-LP single shaft for a turbine rotor must meet requirements such as low susceptibility to temper embrittlement, superior high-temperature properties in the HP portion, and good toughness and high tensile strength in the LP portion.

It is, however, difficult to satisfy all of these requirements at the same time.

The authors applied a low Si type 2.9Ni-0.65Cr-0.50Mo-0.1V steel to an HP-LP single shaft. The results obtained by some tests are as follows:

- (1) Since the Si content and impurities such as P, Sb, Sn and As were reduced to very low levels, the rotor shaft suffered from little embrittlement due to step-cooling.
- (2) Though the tensile strength at elevated temperatures was significantly affected by the Si content, the creep rupture strength was not affected.
- (3) The decrease in tensile strength at elevated temperatures below 500°C due to the reduction of Si content could be compensated by a small increase in Cr content.

1. 緒 言

自家発電用タービンには、装置の単純化と経済性の観点から主に高圧 (HP) 低圧 (LP) 1 体型ローターシャフトが採用される。HP LP 1 体型ローターシャフトでは、HP 側においては耐焼もどし

脆化特性および強度、クリープ等の高温特性が要求され、LP 側においてはすぐれた靱性と強度が要求される。しかしながら同時にこれらの特性を満足させることは困難である。すなわちすぐれた靱性をうる製造プロセスは、高いクリープ破断強度をうるためのものとは一般的に合致しないからである。一方 Si 量の効果は、LP ローターシャフ

* 水島製鉄所管理部部長・工博

*** 水島製鉄所鑄鍛部鑄鍛管理室主任(副部长待遇)

**** 技術研究所水島研究室

***** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員

(昭和55年 8 月 6 日原稿受付)

** 水島製鉄所鑄鍛部鑄鍛管理室主任(掛長待遇)

**** 水島製鉄所管理部検査課主任(課長待遇)

***** 技術研究所水島研究室主任研究員

***** 技術研究所厚板研究室主任研究員・Ph. D.

低 Si 系高低圧一体型タービンローターシャフト材の製造

Manufacture of Low Si Type HP-LP Single Turbine Rotor Shaft

飯田 義治*
Yoshiharu Iida

朝生 一夫**
Kazuo Asoh

和中 宏樹***
Hiroshige Wanaka

小石 想一****
Soichi Koishi

内田 清*****
Kiyoshi Uchida

狩野 征明*****
Seimei Karino

佐藤 信二***** 中野 善文*****
Shinji Sato Yoshifumi Nakano

Synopsis:

An HP-LP single shaft for a turbine rotor must meet requirements such as low susceptibility to temper embrittlement, superior high-temperature properties in the HP portion, and good toughness and high tensile strength in the LP portion.

It is, however, difficult to satisfy all of these requirements at the same time.

The authors applied a low Si type 2.9Ni-0.65Cr-0.50Mo-0.1V steel to an HP-LP single shaft. The results obtained by some tests are as follows:

- (1) Since the Si content and impurities such as P, Sb, Sn and As were reduced to very low levels, the rotor shaft suffered from little embrittlement due to step-cooling.
- (2) Though the tensile strength at elevated temperatures was significantly affected by the Si content, the creep rupture strength was not affected.
- (3) The decrease in tensile strength at elevated temperatures below 500°C due to the reduction of Si content could be compensated by a small increase in Cr content.

1. 緒 言

自家発電用タービンには、装置の単純化と経済性の観点から主に高圧 (HP)-低圧 (LP) 1 体型ローターシャフトが採用される。HP-LP 1 体型ローターシャフトでは、HP 側においては耐焼もどし

脆化特性および強度、クリープ等の高温特性が要求され、LP 側においてはすぐれた靱性と強度が要求される。しかしながら同時にこれらの特性を満足させることは困難である。すなわちすぐれた靱性をうる製造プロセスは、高いクリープ破断強度をうるためのものとは一般的に合致しないからである。一方 Si 量の効果は、LP ローターシャフ

* 水島製鉄所管理部部長・工博

*** 水島製鉄所鉄鍛部鉄鍛管理室主任(副部长待遇)

**** 技術研究所水島研究室

***** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員

(昭和55年8月6日原稿受付)

** 水島製鉄所鉄鍛部鉄鍛管理室主任(掛長待遇)

**** 水島製鉄所管理部検査課主任(課長待遇)

***** 技術研究所水島研究室主任研究員

***** 技術研究所厚板研究室主任研究員・Ph. D.

トでよく知られているように、その含有量を少なくすることにより鋼塊の偏析を減少させ、耐焼もどし脆化特性向上に効果がある。しかしこの場合高温強度、特にクリープ破断強度を低下させると考えられている。このようなSiの効果のために、低Si鋼はLPローターシャフト材において適用事例は数多く見られるもののHPあるいはHP-LP 1体型ローターにはほとんど適用されていない。

今回低Si鋼の特徴を生かし、強度低下はCr増量で補う考えのもとに基礎試験を実施したところ各特性とも満足すべき結果をえたので、製鉄所向自家発電および高炉送風機兼用軸流タービンローターシャフト(HP-LP 1体型)に適用した。完成品の検査においてもすぐれた特性をうる事ができたので以下に概要を報告する。

2. HP-LP 1 体型ローターシャフト製造 に対する事前検討

HP-LP 1 体型ローターシャフトを製造するにあたり、Si, Cr 含有量の影響を中心に化学成分と機械的性質の検討を行った。また要求仕様を十分満足する製品をうるべく最適製鋼プロセスを設定した。さらにHP-LP 1 体型ローターシャフトの特性を十分発揮するように、傾斜焼入れを検討した。つづいてローターシャフトの健全性を保証するため、中心孔探傷装置を設置した。以下に検討結果および装置の概要を示す。

2-1 化学成分と機械的性質

2.9Ni-0.45Cr-0.5Mo-0.1Vの基本鋼を中心に、強度、靱性およびクリープ破断強度に及ぼすSi, Cr含有量の影響を調査した。供試材の化学成分をTable 1に示す。各供試材(22t×250×1mm)は、真空溶解炉にて100kg鋼塊を溶製し、荒鍛造のあ

と熱間圧延にて製造した。焼ならしを行った後840°Cに5h保持し、その後の冷却速度を0.7°C/min(1200φmm 空冷中心部相当)から33.0°C/min(300φmm 水冷中心部相当)までの4水準とし各々610°C×20hの焼もどしを付与する熱処理を行った。強度、靱性と焼入れ冷却速度の関係をFig. 1に示す。C, D鋼は強度補償のためCrを増量した材料で、強度および靱性とも改善されている。

次にG.E.型ステップターリングテストにより焼もどし脆化特性を調査した。調査結果をFig. 2に示す。低Si鋼は、高Si鋼に比較すると脆化は非常に小さいことが明らかである。つづいて高温強度、クリープ破断試験の結果を各々Fig. 3, Fig. 4に示す。短時間高温強度、クリープ破断強度とも、Cr量の若干の増量により低Si鋼は高Si鋼とほぼ同一強度を示すことが明らかとなった。

このように低Si鋼は、焼もどし脆化特性にすぐれ、かつ、クリープ破断強度も高Si鋼にくらべて遜色がないため、今回のHP-LP 1 体型ローター

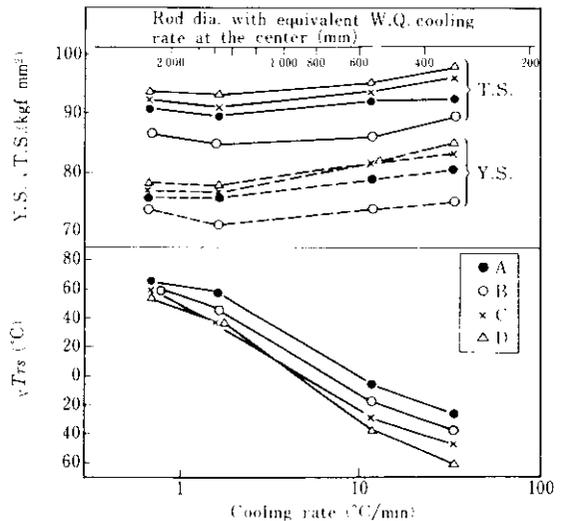


Fig. 1 Effect of cooling rate on strength and toughness

Table 1 Chemical composition of investigated steels

(wt.%)

Steel	Naming	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
A	Standard	0.30	0.27	0.52	0.010	0.009	2.88	0.44	0.50	0.10
B	Low Si	0.31	0.06	0.52	0.011	0.009	2.93	0.45	0.51	0.11
C	Med. Cr	0.31	0.06	0.52	0.011	0.009	2.94	0.68	0.51	0.10
D	High Cr	0.30	0.05	0.51	0.011	0.009	2.91	0.94	0.50	0.10

シャフトに採用することにし、強度（高温強度）補償を考慮して若干のCr増量を行うこととした。

目標化学成分については、Table 2 に示すようにC鋼をベースに、強度に若干の余裕があることおよび靱性の向上を考慮しC含有量を0.25%に設定した。

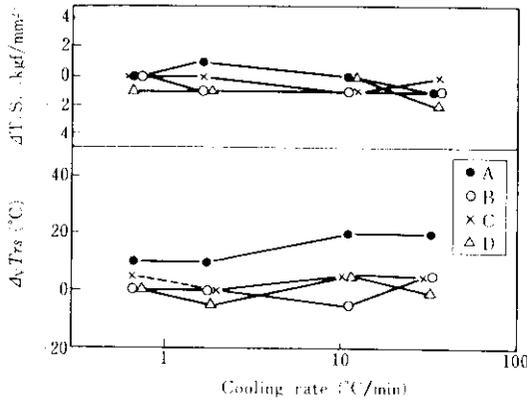


Fig. 2 Effect of cooling rate on strength and toughness (after step cooling)

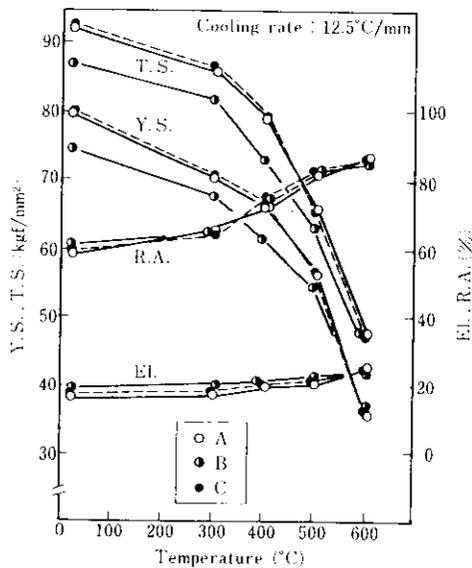


Fig. 3 Tensile properties at elevated temperatures

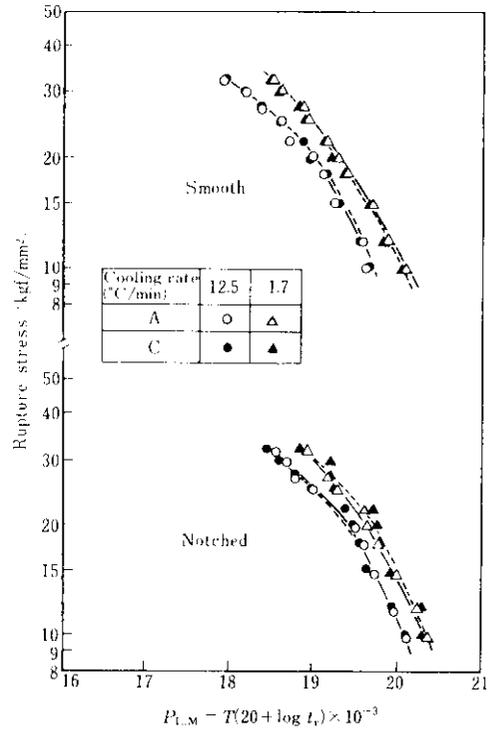


Fig. 4 Relation between Larson-Miller's parameter, $P_{L.M.}$ and rupture stress

2.2 製鋼プロセスの検討

ローターシャフト素材の製造では、製鋼プロセスが品質の大半を決定する。すなわち前述の焼もどし脆化防止策として低Si化ばかりでなくP, Sn, SbおよびAsの低減、偏析軽減のためのP, S, Siの低減、健全性確保のため前記の成分のほかO, Hの低減が重要である。これらのすべての条件を満たすためBOF-EF LRF-真空鑄造プロセスを開発¹⁻³⁾した。

このプロセスの骨子は、BOF-LRFのメインプロセスにEFを介在させ脱Pを行うもので、P+Sが、コンスタントに0.005%以下を得られるものである。かつ転炉鋼を使用することによりSn, Sb

Table 2 Aiming value and heat analysis of chemical composition for rotor shaft material (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Sn	Sb	As
Aiming value	0.25	0.05	0.40	≤0.006	≤0.004	3.00	0.65	0.50	0.10	≤0.02	≤0.003	≤0.003	≤0.0005	≤0.004
Heat analysis	0.26	0.06	0.50	0.002	0.002	2.93	0.66	0.51	0.10	0.01	0.001	0.001	0.0004	0.001

およびAsの低い鋼塊が得られる。

今回のローターシャフト素材は、上記プロセスにより製造したが、最近BOFでの脱P技術が向上しEFを介在させることなく0.005%以下のP-Sが得られるようになった。この技術については後述する。

2.3 傾斜焼入れの検討

HP・LP1体型ローターシャフトには、部位によって冷却速度の異なる傾斜焼入れが望ましい。すなわちHP部でのクリープ特性を向上させるためには、焼入れ冷却速度を小さくした上部ベイナイト組織がよく、一方LP部での低温靱性を改善するためには、焼入れ冷却速度をできるだけ大きくしてマルテンサイト+下部ベイナイト組織にする必要がある。1体型ローターシャフトにこの傾斜焼入れを採用するため普通鋼で製品と同一形状のモデルを製作し測温実験を実施した。当社のスプレー装置は、有効寸法1700mmφ×10mである。4柱に取りつけたノズルは1ゾーン12個で11ゾーンの各ゾーン制御が可能である。被冷却材は2rpm程度の回転を与えることができる。噴霧水量の制御は、エアの背圧(P_a)により行い、 P_a が0.55~3.3kgf/cm²の範囲で P_a と水の流量が比例する。傾斜焼入れのセット状況をFig. 5に示す。

HP相当域は、0.55kgf/cm²とし、LP相当域は3.3kgf/cm²にセットした。840°Cに20h保持後、スプレー冷却を実施した結果をFig. 6に示す。概ね5hのスプレー冷却が必要となる。この場合の冷却速度のCCT曲線との対応をFig. 7に示すが、HP部、LP部ともフェライトノーズをさけることが可能であり、また低圧部表層部は、下部ベイナイト組織が得られることがわかる。

2.4 中心孔内探傷装置の検討

タービンローターシャフト等の高速回転体においては、中心孔内面からの非破壊検査が義務づけられることが多い。今回のローターシャフト製造を契機に超音波(UT)、磁粉(MT)および浸透(PT)各探傷試験の中心孔内探傷装置を開発した⁴⁾。これらの装置の特徴を以下に列挙する。

(1) UT探傷方式は、被検査材を固定しUT探触子または管内検査器を回転させる方式とし、工場内の

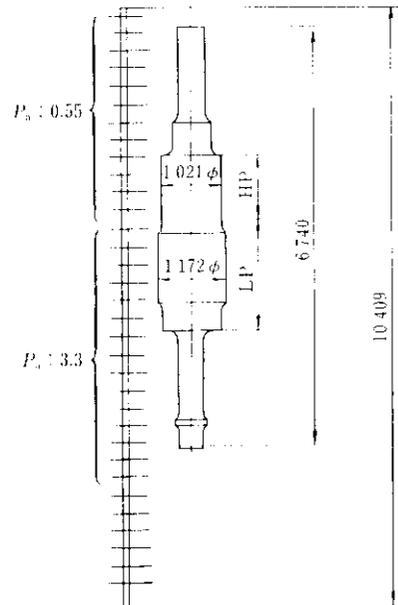


Fig. 5 Setting condition for inclination quenching

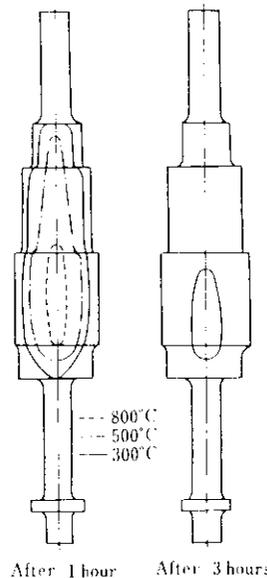


Fig. 6 Temperature distribution during water spray cooling after holding temperature at 840°C

移動使用も可能とした。また隣接走査における探傷域のオーバーラップは100%まで可能とした。

(2) UT探触子は、垂直式分割型探触子と斜角探触子とを組み込んだ複合探触子を採用した。

(3) MTは、長手方向および円周方向の2種類の

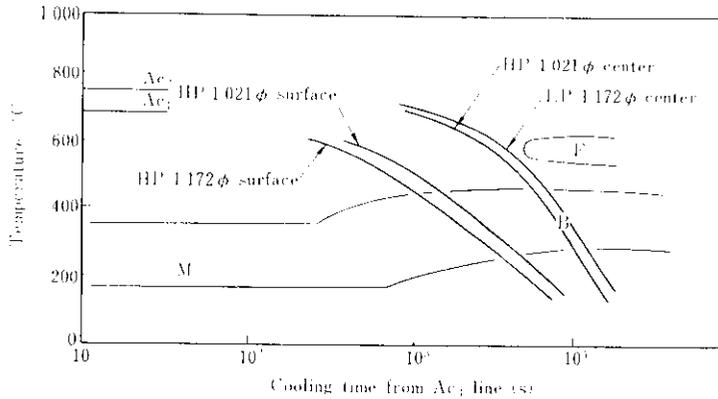


Fig.7 CCT curves corresponding to cooling conditions as shown in Fig.6

磁化により全方向の表層部欠陥が検出できる方式とした。

(4) VTR 装置を取りつけ、探触子または管内検査器の前進位置および回転角度を UT 探傷図形または中心孔表面指示画像に重畳させて録画できるような新しい信号処理を採用した。

この中心孔探傷装置により中心孔径 60~150mm、中心孔長さが最大片側より 10m のものまで探傷が可能となった。中心孔 UT 探傷状況を、Photo.1 に示す。

3. HP-LP 1 体型ローターシャフトの製造

前章に述べた事前検討に基づいて、HP-LP 1 体型ローターシャフトを製造した。

3.1 製造工程

製造工程を Fig. 8 に示す。製鋼は BOF-EF LRF-真空鑄造プロセスとし、70t 鑄型は H/D

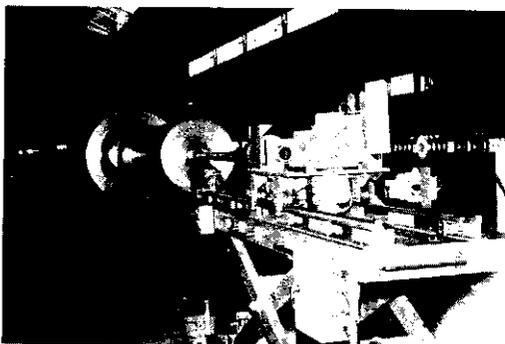


Photo.1 Ultrasonic testing equipment for center hole

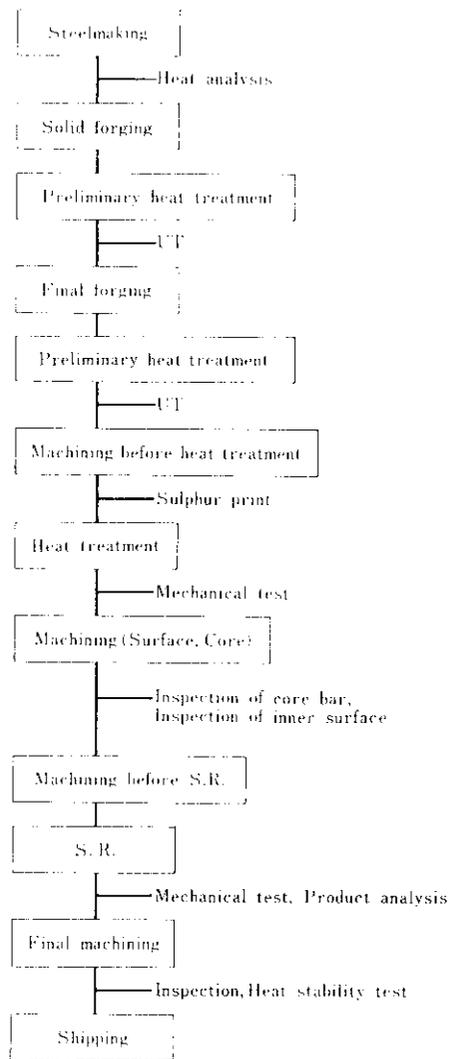


Fig.8 Manufacturing process of an HP LP single rotor shaft

(H : 本体高さ, D : 本体直径) が 1.1 のものを採用した。鍛造においては、鋼塊全体の性状を合わせて確認するため、荒押段階で内部性状を UT により調査した。前熱処理は、脱水素処理と合わせて 2 回焼ならしを実施し整粒および細粒化をはかりその後焼もどしとした。2 回目の前熱処理は、2 回焼ならしおよび焼もどしのみとした。また調質熱処理は前章に述べた傾斜焼入れを採用した。

3-2 製 鋼

取鋼分析値を目標値と合わせて Table 2 に示す。BOF 母溶鋼使用により、As, Sn および Sb などの不純物元素量は非常に低くなっている。また溶銹脱硫による低 S 化および EF による脱 P により、P, S は各々 0.002% であった。その他の成分もほぼ目標どおりの値がえられた。

3-3 鍛 錬

鍛錬でのポイントは、内部欠陥の圧着とともに、いかに偏心を小さくするかである。偏心防止のため据込時には、R 付の治具を使用し、荒押時は圧下量、回転方向等のパススケジュールを管理した。偏心はグリップ部と本体部との段差にあらわれ、この値のバラツキが小さいと偏心は小さいと考えられる。実績は Fig. 9 に示すとおり、非常に小さい値となっている。また今回荒押段階で UT を実施したが、鋼塊本体相当部においてすべて欠陥がなかったため、トップボトム部の切捨てを均等に行った。

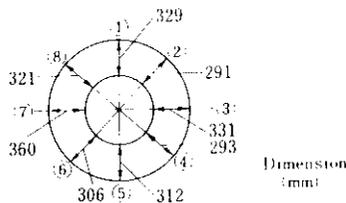


Fig. 9 Distance between body area and grip area

3-4 調質熱処理

調質熱処理は、豎型電気炉および前述のスプレー冷却装置により実施した。950°C に 20h 保持後強制空冷し、840°C × 22h 保持後スプレー傾斜焼入れを行った。焼入れの冷却条件は、前述の測温実

験と同一とした。その後 615°C × 31h 保持・加冷の焼もどしを実施した。スプレー焼入れ時の状況を Photo. 2 に示す。

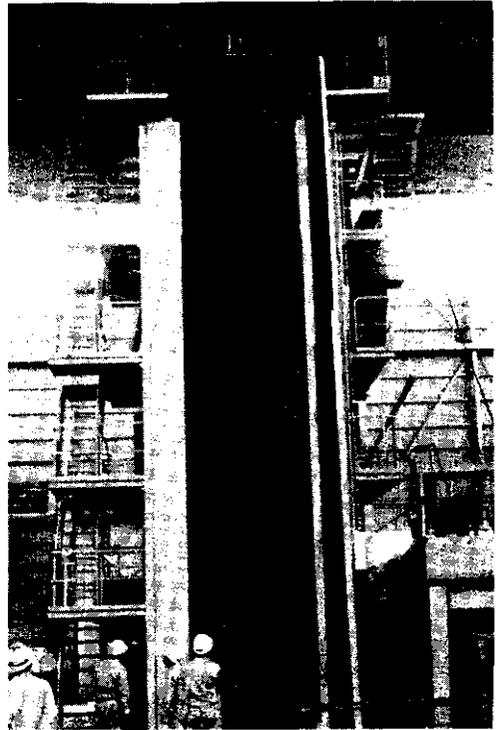


Photo. 2 Setting of an HP-LP single rotor shaft before inclination quenching

3-5 機械試験

S.R. 処理後機械試験を実施した。試験片採取部位を Fig. 10、引張、衝撃試験結果を Table 3 に示す。Step cooling 処理後の値も併記しているが、処理前の値と比較してほとんど差がないことが明らかである。引張強度は、部位による差は小さいが、中心に近づくにつれ、若干低下している。衝

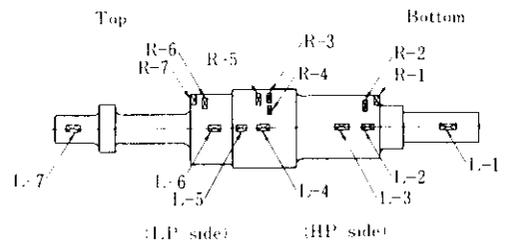


Fig. 10 Sampling positions in an HP-LP single rotor shaft

Table 3 Results of tensile and impact tests

Position	Direction	Tensile test				Impact test		
		Y.S. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	EL. (%)	R.A. (%)	E_{25} (ft·lb)	FATT (°C)	E_{shelf} (ft·lb)
L-1	L	80	92	22	67			
L-2	L	78	90	21	67			
L-4	L	79	91	21	65	64	25	115
L-5*	L	—	—	—	—	73	0	115
L-6	L	78	90	21	65	67	5	112
L-6*	L	76	89	23	64			
L-7	L	80	90	21	67			
R-1	R	86	94	21	63	109	-110	120
R-2	R	79	90	21	69	62	10	108
R-3	R	81	92	20	67	74	-5	106
R-4	R	76	89	19	66	53	43	—
R-5	R	76	88	21	61	45	30	103
R-5*	R	75	87	19	57	43	20	
R-6	R	80	91	20	69	84	0	103
R-7	R	88	96	22	65	109	-95	125

* Results after step cooling

撃特性も同じ傾向を示している。またクリープ破断試験の結果を Fig. 11 に示す。現在試験を継続中のものもあるが、破断した場所はいずれも平滑部であり、良好なレベルである。これらは傾斜焼入れが、計画どおり、実施されたためと考えられる。

つづいて破壊靱性試験を実施した。外周部からは 2T CT 試験片、中心孔コアバーからは厚さ 10mm

の 28φ RCT 試験片を採取した。試験結果を Fig. 12 に示す。 K_{IC} は外周部と中心孔コアバーで顕著な差はみとめられず 0°C で 300kgf√mm/mm²、50°C で 540kgf√mm/mm² であった。得られた K_{IC} は、Greenberg ら⁵⁾ の与えているバラツキのバンド内に位置している。

3-6 製品分析

製品分析結果を Table 4 に示す。取鍋分析結果とはほぼ同じ値で、かつ、偏析の小さい製品である。さらに特徴的なこととして O 値の低いことが挙げられる。この O 値の低減によって、清浄度 (dT) が 0.01~0.02% と向上したと考えられる。

3-7 完成検査

前述の中心孔内探傷装置により中心孔 UT、MT および PT を実施した。UT の感度は、垂直探傷の場合内壁からの深さ 30mm の位置で 1.6mmφ の平底欠陥が 80%+6dB で評価できるように、また斜角探傷は内壁からの深さ 5mm において 2φ×22mm

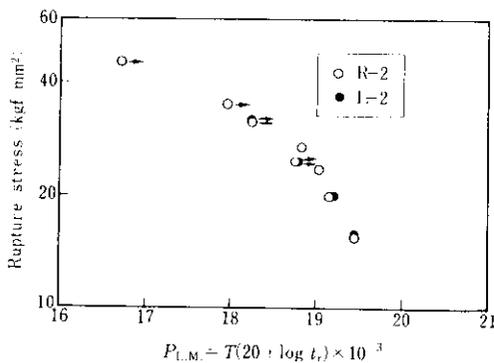


Fig. 11 Relation between creep rupture stress and Larson-Miller's parameter, $P_{L.M.}$.

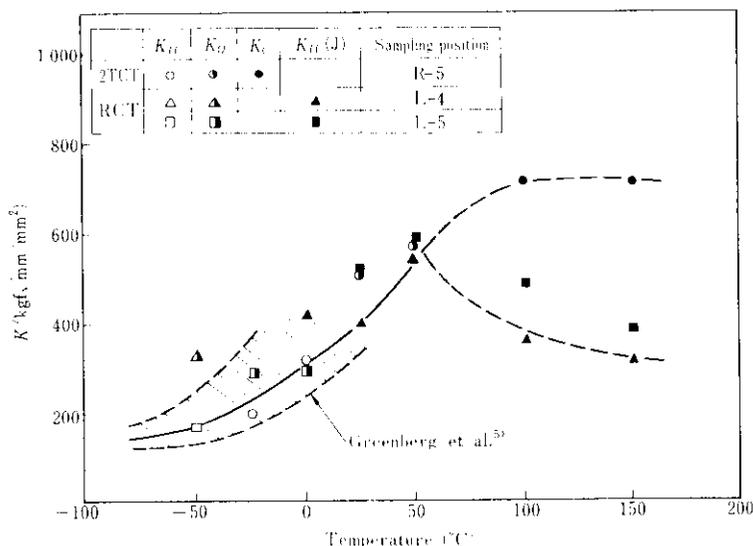


Fig.12 Relation between fracture toughness and temperature

Table 4 Chemical composition of product

(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Sn	As	Sb	Bi	O
	×100			×1000		×100				×1000			×10000		×10000	
Heat analysis	26	6	50	2	2	1	293	66	51	98	1	1	1	4		
L 1	26	7	50	2	2	1	294	66	48	100	2	1	1	5	10	14
L 2	26	7	51	2	2	1	295	67	49	100	2	1	1	5	10	15
L 6	28	8	51	3	3	1	292	66	49	100	2	1	1	5	10	14
L-7	28	8	51	3	3	1	297	67	50	100	2	1	1	5	10	14
R 2	26	7	50	2	2	1	296	66	48	100	2	1	1	5	10	13
R 3	26	7	50	3	3	1	295	66	48	100	2	1	1	5	10	16
R 4	27	7	50	2	2	1	296	67	49	100	1	1	1	5	10	14
R 6	26	7	50	2	2	1	292	66	48	100	1	1	1	5	10	16

の横孔欠陥が80%+12dBで評価できるように設定した。MTは中心孔内ではD.C.800Aでの電流貫通法、外表面ではA.C.60Hzでの極間法の2方法で実施した。すべての検査において欠陥は認められなかった。PTでも無欠陥であった。

熱安定性試験では、熱間計測と2次冷間計測の間の変位は、最大0.029mmであり良好なレベルであった。

このように低Si鋼の特徴を生かし、若干のCr増量により強度、靱性およびクリープ特性のすぐれたHP-LP1体型ローターシャフトを製造することができた。また表層および内部にも欠陥もな

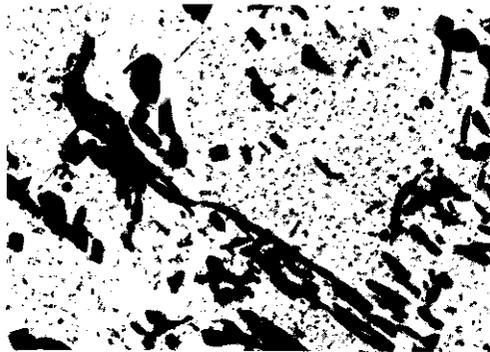
く、フレの小さいシャフトであることを確認した。

4. 考 察

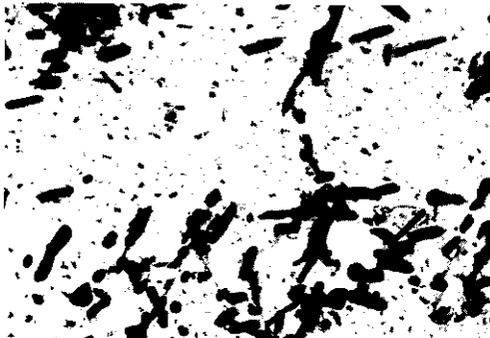
4-1 クリープ破断特性について

クリープ破断特性と熱処理の関係は、フェライトの析出がみられない程度の上部ベイナイト組織の方が、より焼入れ冷却速度の大きい領域でえられる下部ベイナイト組織よりも一般的に破断強度は高い。また焼入れ温度を高くした場合も同様に高い。この現象は V_4C_3 を主体とした炭化物の分

散度の違いに関連すると考えられ⁶⁾、Photo. 3 に示すクリープ破断後の組織に見られるように焼入れ温度が高くまた焼入れ冷却速度の小さいほど微細炭化物が均一分散することに起因する。次にクリープ延性の指標として通常用いられる破断伸び、絞りと切欠破断強度との間には何らかの関係があると考えられ切欠部と平滑部の破断時間の比と絞



Quenching temp. : 840°C
Cooling rate : 12.5°C/min
 $t_r = 76.4h$



Quenching temp. : 840°C
Cooling rate : 1.67°C/min
 $t_r = 309h$



Quenching temp. : 900°C
Cooling rate : 1.67°C/min
 $t_r = 502h$

Photo. 3 Electronmicrographs of V_4C_3 carbides in specimens of steel A which creep ruptured at 600°C and 18kgf/mm²

りの関係を整理した。その結果を Fig. 13 に示す。両者間には必ずしも明瞭な相関があるとはいえないが、切欠強化から切欠弱化への移行は、約 20% の絞りに対応する。ここで絞りととの対応をみたのは、絞りは伸びと異なり破断位置の影響を受けにくく、バラツキが小さいためで、絞り約 20% は、伸び約 10% にほぼ対応する。

次に今回のローター材は、真空 C 脱酸により低 Si 化を施したものであるが、事前検討においてクリープ破断強度には高 Si 材と差がないことを確認した。クリープ破断特性を Si 量で整理した結果を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。高 Si、低 Si 材のクリープ破断特性に差がない現象は、Si の焼入れ性への影響を介して定性的に理解される。すなわち、低 Si 材は高 Si 材にくらべて焼入れ性が低いため相対的に徐冷材に相当し、常温および比較的低い温度での強度に対してマイナスサイドとなるが、クリープ強度に対してはプラスサイドの効果を示したためと考えられる。Si の同様な効果は 2%Cr-1Mo 鋼などでも見い出されている⁶⁾。

次に Cr の影響について調査した結果を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。0.45~0.94% の範囲でのクリープ破断強度は、Cr の影響をほとんどうけていない。一方破断延性に対しては、0.94%Cr でやや低下する傾向も認められるが、0.68% までの Cr 増加では、ほとんど変化していない。Cr も焼入れ性を増加させる元素であるが、Si と異なり Cr はそれ自身で炭化物をつくり、高温強度に寄与するた

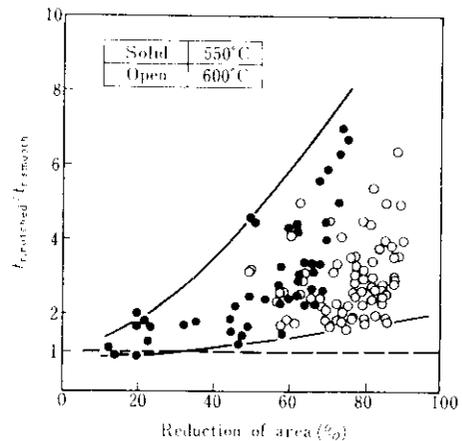


Fig. 13 Relation between $t_{r,notched}/t_{r,smooth}$ and reduction of area of smooth part

め、クリープ破断強度の低下をもたらさなかったものと考えられる。

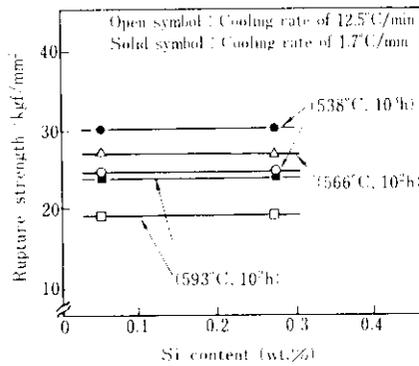


Fig. 14 Effect of Si content on creep rupture strength

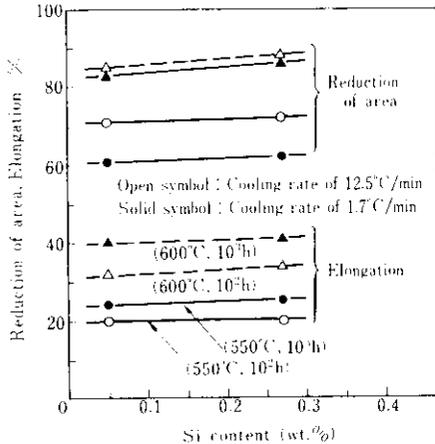


Fig. 15 Effect of Si content on creep rupture ductility

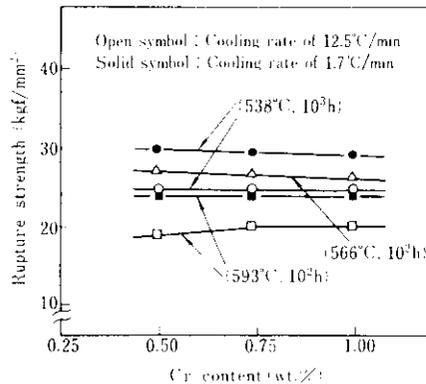


Fig. 16 Effect of Cr content on creep rupture strength (Si: 0.05%)

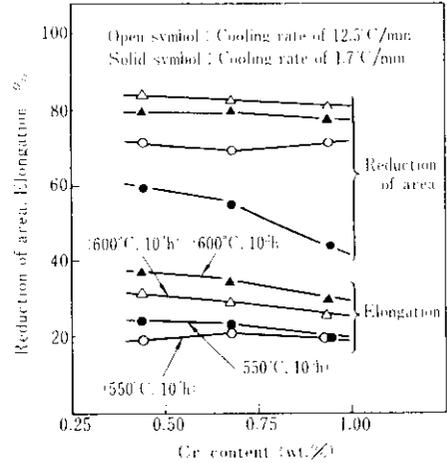


Fig. 17 Effect of Cr content on creep rupture ductility (Si: 0.05%)

4.2 BOF-LRF-真空鑄造プロセスについて

今回のHP-LP1体型ローターシャフトは、BOF-EF-LRF-真空鑄造プロセスを採用したが、最近ではBOFでの脱P技術の向上によりBOF-LRF-真空鑄造プロセスを採用している。BOFでの改善点は以下のとおりである。

- (1) ランス振動装置を使用したBOF全自動精錬技術、滓化促進によるBOF内脱Pの向上
- (2) BOF KG法を用いたが内強攪拌技術

BOFにて炉底からのAr gas吹き込みにより溶鋼-スラグ間の反応促進による脱Pの向上

- (3) 取鍋脱Pフラックスの使用

出鋼時、取鍋に脱Pフラックスを使用する方法
このようなBOFでの脱P技術の向上により、Pレベルは、EFを介在させた場合と同等のレベルまで低減させることができる。一方S値については、トビード脱硫およびインペラ脱硫技術の向上により、やはり同等のレベルまで低減させることが可能となった。

BOF-LRF-真空鑄造プロセスによる鋼塊の最近の不純物元素の含有状況をTable 5に示す。各不純物元素とも非常に低い値となっており、かつPとSの合計が0.005%以下である。さらにH値も低い値であり、これはLRFでのAIS法³⁾適用の効果が大きい。

Table 5 Impurities in products recently produced through a BOF-LRF-VC process (wt.%)

Weight of ingot (t)	P	S	Cu	As	Sn	Sb	H(ppm)
100	0.003	0.002	0.01	0.002	0.001	0.0004	0.5
100	0.003	0.002	0.01	0.002	0.001	0.0003	1.0
100	0.003	0.002	0.01	0.002	0.001	0.0002	0.7
100	0.002	0.002	0.01	0.002	0.001	0.0005	0.6

4.3 偏析について

HP-LP1 体型ロータリーシャフトの製造には、70t 鋼塊を使用した。この鋼塊の押湯部および湯だまり部を除く鋼塊本体部全域にわたって偏析を調査した。併せて 3.8Ni 1.8Cr 0.4Mo 鋼のゼネレーターシャフトについても調査した。この使用鋼塊も 70t である。偏析率の調査結果を Table 6 に示す。代表的な C の偏析は、ロータリーシャフトの場合 12%、ゼネレーターシャフトでは 16% であった。C 偏析は、Si 脱酸または真空 C 脱酸の区別なしに Comon⁷⁾ の計算値に対応するといわれ、真空 C 脱酸の効果自体に偏析軽減効果があるのではなく、ただ Si が低いために偏析が軽減すると考えられる⁸⁾。また P、S の低減および鑄型の H/D の適正

設定も偏析低減に効果があったと考えられる。

このように偏析低減のためには、真空 C 脱酸の採用 (Si の低減)、BOF-LRF-真空鑄造プロセス採用による P、S の低減および H/D の小さい鑄型の使用が効果的である。

5. まとめ

2.9NiCrMoV 鋼製鉄所向 HP-LP1 体型ロータリーシャフトを低 Si 鋼の特徴を生かし、強度の低下は若干の Cr 増量により補償することにより、強度、靱性およびクリーブ特性ともすぐれた製品が得られた。製鋼プロセスは BOF-EF-LRF 真空鑄造で、P、S、Cu、Sn、As、Sb などの不純物元素を低減させることができた。この結果すぐれた靱性レベルが得られるとともに、ステップクーリングによる脆化は、ほとんど生じなかった。またクリーブ特性についても十分な値が得られたが、これには傾斜焼入れの効果があったと考えられる。

偏析は低 Si 化、P、S の低減および H/D の小さい鑄型を使用することにより非常に小さくすることができた。

一方中心孔検査などにより欠陥がみとめられなかったことは、低 S 化 (特に MT 欠陥に効果あり)、

Table 6 Segregation ratio for the body area of a 70t ingot

(wt.%)

Chemical composition	Rotor shaft					Generator shaft				
	C ₀	Min.	Max.	ΔC	ΔC/C ₀	C ₀	Min.	Max.	ΔC	ΔC/C ₀
C	0.26	0.25	0.28	0.03	12	0.19	0.18	0.21	0.03	16
Si	0.06	0.06	0.08	0.02	33	0.10	0.12	0.13	0.01	10
Mn	0.50	0.50	0.51	0.01	2	0.27	0.27	0.29	0.02	7
P	0.002	0.001	0.003	0.002	100	0.002	0.002	0.003	0.001	50
S	0.002	0.002	0.003	0.001	50	0.003	0.002	0.004	0.002	67
Ni	2.93	2.92	3.01	0.09	3	3.89	3.84	3.98	0.14	4
Cr	0.66	0.65	0.66	0.01	2	1.88	1.87	1.95	0.08	4
Mo	0.51	0.48	0.50	0.02	4	0.40	0.38	0.43	0.05	13
V	0.10	0.10	0.10	0	0	0.09	0.09	0.11	0.02	22
O	0.0024	0.0010	0.0025	0.0015	63	0.0024	0.0017	0.0030	0.0013	54
dT	—	0	0.017				0	0.025		

C₀: Ladle value

ΔC: Max. Min.

低酸素、真空C脱酸による鋼塊段階でのサクの低減などによるほか、適正な鍛錬が行われたと判断できる。

終わりに当HP-LP1体型ローターシャフトの

製造に際して、三菱重工業(株)高砂製作所殿に技術的な面で多大の御助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 飯田、山本、宮井、江本、難波：鉄と鋼，**64** (1978) 4, S 186
- 2) 朝生、和申、飯田、内田、狩野、山野辺、馬場：鉄と鋼，**65** (1979) 4, S 186
- 3) 飯田、山本、松野、山浦、朝生：川崎製鉄技報，**12** (1980) 1, 27
- 4) 森田、入谷、宇野：鉄と鋼，**64** (1978) 4, S 249
- 5) H. D. Greenberg, et al.: Convegno Internazionale della Fucinatura, Terni, Italien, (May, 1970)
- 6) 熊田、土屋：学振耐熱金属材料委員会研究報告，**7** (1966) 1
- 7) J. Comon, J. Delorme, P. Bastien: The 6th Int. Forgemasters Meeting, (1972)
- 8) 松野、岡野、西村、山本、朝生：鉄と鋼，**65** (1979) 4, S 136