エネルギー工業用低合金鋼 大型鍛鋼品の高純度化と高性能化

石 黒 徹* 田 中 泰 彦**

1. 緒 言

火力・原子力発電、石油精製等のエネルギー工業において、プラントの大規模化は使用される圧力容器、回転軸などの主要構造機器の大型化、厚肉化を促してきた。原子炉圧力容器、蒸気発電用回転軸、石油精製に使用される直接脱硫・重質油水素化分解リアクターなどがその範疇である。それらの主要機器は大型鍛造品で構成され、高温・高圧力あるいは高い遠心応力下で供用されるため、破壊に対する高い安全性が要求されてきた。また、プラントの大容量化は、鍛鋼品寸法の大型化およびこれを供給するに要する鋼塊の大型化と歩調を併せて進められている。なお、信頼度の高い大型鍛鋼品を製造するうえでの技術革新の中核には、常に、清浄かつ不純物元素の少ない鋼塊の精錬・造塊技術があったものといえる。

ここでは、大型低合金鍛鋼品の代表例として、発電用の蒸気タービン回転軸および石油精製用圧力容器を中心として、高純度化と品質の変遷、最近の研究開発の動向などを述べる。

2. プロセスの大容量化、高効率化

図1には火力・原子力発電プラントの単機発電容量と使用される低圧タービンロータ軸製造に必要な鍛鋼品用大型鋼塊質量の年次変遷を示した。1960年代後期から、原子力発電プラントの出現やタービン技術の発展に伴って、単機あたりの発電容量は飛躍的に増大し⁽¹⁾、それに比例して軸製造に必

図1 タービン発電機の最大単機容量と最大鋼塊質量の変遷。

要な鋼塊寸法も大型化し、現在最大鋼塊質量は600トンに達している。また、石油価格高騰への対処や化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出量の低減の目的で、タービンを回転させる蒸気をさらに高温高圧化し発電効率を上げる超々臨界圧発電プラントの開発、さらにはその建設が進んでおり、タービンの高性能化には著しいものがある。こうした超々臨界圧プラント部材に用いられるタービン素材には既存の材料よりもさらに優れた高温強度、低い焼戻し脆化感受性が要求され、その開発には高純度化技術が不可欠な役割を果たしている。一方、石油精製プロセスにおける直接脱硫・重質油分解圧力容器は $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼を使用した大型溶接構造の厚肉鍛造リ

* 株式会社日本製鋼所室蘭研究所主幹研究員(〒051 室蘭市茶津町4)

** 株式会社日本製鋼所室蘭研究所主任研究員

Recent Trends of Purifications in Large-sized Low Alloy Steel Forgings for Energy Industries; Tohru Ishiguro, Yasuhiko Tanaka (Muroran Laboratory, The Japan Steel Works, Ltd., Muroran)

Keywords: electric power, low alloy steel, steel forging, pressure vessel, rotor shaft, temper embrittlement, ingot making, impurity element

1993年10月27日受理

ングから製作され、プラントの大容量化と高効率化を目的とした運転温度の高温化が推し進められている⁽²⁾。現在では1200トンに達する質量の大型リアクターが製作されており、長期高温運転中の経年脆化を防止するため、鋼材の高純度化が強く求められている。

3. 溶解・造塊技術の変遷

上述したように、600トンの質量を有する大型鋼塊の製造に到達するまでには、多くの溶解・造塊技術の改良がなされてきた。図2は、筆者らが所属する製鋼所における製鋼技術の変遷を取り纏めて示した。1960年代末まで使用された酸性・塩基性平炉は塩基性電気炉へ置き換えられた。また、鋼中に数ppmのオーダで存在し、白点生成などの内部欠陥の原因となった水素は、スチームエジェクターを使用した真空鑄造設備の導入により、1ppm以下に低減することに成功した。その結果、水素による脆化問題は解決した⁽³⁾。また、この真空流滴脱ガス法の採用により、溶鋼中の酸素はCOガスとして除去され、従来のSi脱酸にかわって低Si-VCD (vaccum carbon deoxidization)が広く実用化されるように到った⁽⁴⁾。この技術は、後述するように、鋼材の高靱性化に大きく貢献している。

また、1980年初期にはイオウおよび酸素等の不純元素濃度をさらに低減する目的から、電気炉で溶解した溶鋼は取鍋精錬炉により二次精錬され、いわゆる大型鋼塊の二重真空脱ガス法が確立した⁽⁵⁾。その結果、10ppmのオーダのイオウと酸素、0.5ppmオーダの水素にまで高純度化した世界最大

の600トン鋼塊が製造されるに到っている。また、大型鋼塊における鑄型設計の最適化により、炭素など合金元素のマクロ偏析が著しく低減された⁽⁶⁾。

4. 高純度化と高性能化

単機発電容量に比例して進んできた鋼塊寸法の大型化の過程で開発された新しい製鋼技術は、不純元素、非金属介在物、偏析などの低減を容易にし、大型鍛鋼品の性能を飛躍的に向上させることができた。1954年から1956年にかけて、米国において続発した蒸気タービン軸およびタービン発電機軸の破壊事故は、真空処理した塩基性電気炉の全面的採用を促し、近代製鋼技術の基礎づくりの背景となった⁽⁷⁾。これらの破壊事故のいくつかは水素系欠陥を起点としたものであり、また、Pなど不純物元素の粒界偏析による焼戻し脆性に関与していた。このように、低合金鋼製大型回転軸あるいは高圧圧力容器の高品質化の歴史は、実損傷の解析結果を製造技術の改良へ繰り返しフィードバックし、進んできたものと言える。

これらの観点から低合金鋼製回転軸材を例にとり、製鋼技術の変遷に伴う不純物元素の推移を鋼中のPおよびS濃度でみたのが図3である。1958年～1986年に到る約30年の期間に、これらの不純物元素濃度はおよそ10分の1まで低減がなされている。一方、これに対応して、大型回転軸の芯部から採取した試験片の引張破断絞り値は、図4に示すように、年次とともに向上している。この軸芯部の機械的性質の評価は、高速回転体での遠心応力の高い個所の性能を評価す

年	年号	25 (昭和)	30	35	40	45	50	55	60	(平成)
	西暦	'50	'55	'60	'65	'70	'75	'80	'85	'90
溶解法	酸性平炉，塩基性平炉									
	(1 次精錬)									
	塩基性平炉，電気炉					電 気 炉				
	(2 次精錬)					保 持 炉		取鍋精錬炉		
								150 ^{トン} ，130 ^{トン}	30 ^{トン} X2	150 ^{トン} X2
造塊法	大気鑄造		Bochumer-Verein 式流滴脱ガス真空鑄造							
			メカニカルブースター(低真空)				スチームエジェクター(高真空)			
			(技術開発)		MP 法開発*	低 Si-VCD 法開発	偏析予測法開発	2 重脱ガス 法確立		
最大 銅塊	140 ^{トン}		220 ^{トン}	250 ^{トン}	400 ^{トン}	500 ^{トン}	570 ^{トン}	600 ^{トン}		
	(鑄型設計)						低 H / D 化，高テーパ化			

*：多ヒート鑄込み

図2 大型鋼塊の溶解・造塊技術の変遷。

図3 NiCrMoV 低合金鋼ロータ軸材のP, S 含有量の変遷.

図4 NiCrMoV 低合金鋼ロータ軸材の軸芯部引張破断絞りの推移.

ることを目的としたものである。特に、主鍛造方向に平行および直角方向の破断延性に認められる異方性は、その原因となる硫化物系、酸化物系介在物の低減により大幅に改善され、破壊安全性に対する高純度化の寄与度は極めて大きいと言える。

高温環境で使用される低合金鋼では、長期運転中の材料の

経時劣化に対する配慮が極めて重要となるのは言うまでもない。623～823 K の温度域で使用される高温用機器材に生じる焼戻し脆化や原子炉圧力容器材に生じる中性子照射脆化はその例であり、いずれも鋼中の不純物元素が脆化に関与している。

発電用のタービン軸用 NiCrMoV 鋼や石油精製圧力容器

用 $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼などの低合金鋼は焼戻し脆化感受性が高い鋼種として知られ、過去に焼戻し脆化が誘因となり破壊した例がある⁽⁷⁾。図 5 に、1970 年代前半に製造された 3.5%NiCrMoV 鋼製低圧タービン軸材を 616 K から 727 K の間で 360 Ms (10^5 h) まで等温時効したときのシャルピー 50%破面遷移温度の変化 ($\Delta FATT$) を示す。616 K の時効では数 10 K、672 K および 727 K の時効では、最大 250 K におよぶ脆化が生じている⁽⁸⁾。特に、3.5%NiCrMoV 鋼軸材は高い焼戻し脆化感受性を有するため、現用の低圧タービンでは使用上限温度を 623 K とする設計がなされてきた。

焼戻し脆化は、P, As, Sn, Sb などの不純物元素の粒界偏析により起こり、これらの粒界偏析量が多いほど靱性が劣化する。また、Si, Mn のように製鋼工程で脱酸材として添加

される元素の存在により脆化が加速される⁽⁹⁾。そのため、鋼の焼戻し脆化感受性は、これらの不純物元素量および効果量を関数とした焼戻し脆化パラメータによって整理されている⁽¹⁰⁾。

図 6 に、焼戻し脆化の加速試験であるステップクール処理を行った 3.5%NiCrMoV 鋼および $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼について、シャルピー遷移温度の変化量と脆化パラメータ (J-Factor) ($(\text{Si} + \text{Mn})(\text{P} + \text{Sn}) \times 10^4$) との関係を示した。両鋼の脆化量の J フォクターへの依存性は異なるものの、脆化量は J-Factor と比例関係にある。これらの結果を基にして、火力・原子力発電用部材、石油精製用圧力容器などの製造にあたっては、炉外精錬技術などを駆使した有害不純物元素の低減、すなわ

図 5 3.5%NiCrMoV 低合金鋼ロータ軸材の長時間等温時効試験におけるシャルピー遷移温度のシフト。

図 6 3.5%NiCrMoV 鋼および $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼の J-factor と遷移温度上昇の関係。

図 7 圧力容器用 $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼製鍛造シェルにおける J-factor の年次推移。

ち徹底した高純度化がはかられてきた。図7の $2\frac{1}{4}$ -Cr-1Mo鋼製圧力容器部材の高純度化に伴うJ-Factorの年次推移から分かるように、現在では脆化感受性の極めて少ない材料が製造され、使用されている。

高純度化により実用化された発電プラント用主要機器材としてスーパークリーン3.5%NiCrMoV鋼がある。現在、超々臨界圧発電は効率の高い発電技術として注目されている。そのプラント実現にとって、低圧タービン入口の蒸気温度は673~723 Kとなるため、この温度域における運転で脆化しないNiCrMoV鋼の開発が大きなキープポイントであった。米国のElectric Power Research Instituteを中心とした日米欧の高純度鋼開発プロジェクトが生まれ、不純物元素を極限まで低減するスーパークリーン3.5%NiCrMoV鋼製造技術が開発された⁽¹¹⁾。スーパークリーン鋼の許容不純物元素量は、質量%でSi $\leq$ 0.03 max., Mn $\leq$ 0.05 max., P $\leq$ 0.005 max., S $\leq$ 0.002 max., As $\leq$ 0.005 max., Sn $\leq$ 0.005 max., Sb $\leq$ 0.002 max., H $\leq$ 1.5 ppm max. と高純度レベルであるが、炉外精錬技術の進歩により実機規模で十分に達成可能となった⁽¹²⁾。また、そのスーパークリーン鋼は、616~727 Kで108 Msの時効においても、殆ど脆化は認められず、高純度化によりJ-Factorを1桁台まで低減させた効果が確認された。さらに、クリープ強度、低サイクル疲労強度、耐食性などが著しく改善され、高純度化は焼戻し脆化感受性の低減以外の諸特性向上に大きな貢献をはたすことが認識された⁽¹³⁾。

発電プラントにおける熱効率の向上は、蒸気温度および圧力を高めることにより達成されてきた。プロセス開発途上の超々臨界圧発電における主蒸気温度は922 Kに達すると予想され、12Cr系マルテンサイト鋼を中心とした高温強度の

優れたタービン関連機器素材の開発が進みつつある⁽¹⁴⁾。一方、近年、合金鋼の高純度化は高温機器用鋼材のクリープ強度向上に有効であることが確認されつつある。図8にスーパークリーン3.5%NiCrMoV鋼のクリープ破断強度を従来材と比較して示した。脱酸材としてのSi, Mnを添加せず、P, Snなどの不純物元素を極力低減したスーパークリーン化によって、クリープ破断強度の向上することが分かるが、その機構については明らかでない⁽¹⁵⁾。すなわち、低合金鋼の高純度化によって、より高温強度の優れた材料開発が大いに期待される。

5. 結 言

エネルギー工業に使用される低合金鋼大型鍛鋼品における高純度化の推移を述べた。酸素、水素などのガス成分を含めた不純物元素のコントロールは、機器の安全性の観点で必要とするレベルまで一応到達したものとみられるが、技術の革新に要した時間も極めて長い。地球環境問題に対する強い認識から進められつつある発電プラントの高効率化は、運転温度の高温化を指向している。それに対応した材料開発において、低合金鋼の高純度化は重要なポイントであることは言うまでもない。

文 献

- (1) 森谷新一, 堀内三千男, 松隅雅治, 青柳和雄, 井上雅賀, 能勢正見: 火力原子力発電, **41**(1990), 1620.
- (2) 石黒 徹: 鉄と鋼, **73**(1987), 34.
- (3) 池見恒夫: 日本製鋼所技報, **2**(1959), 111.
- (4) K. Suzuki, K. Taniguchi and J. Watanabe: 6th International Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting and Metallurgical Coatings, April, (1979), San Diego, California, USA.
- (5) 竹之内朋夫: 日本製鋼所技報, **46**(1992), 108.
- (6) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **63**(1977), 53.
- (7) 渡辺十郎: 鉄と鋼, **64**(1978), 1020.
- (8) 東 司, 八重樫範明, 田中泰彦, 池田保美, 吉田 一: 材料とプロセス, **6**(1993), 703.
- (9) Y. Murakami, T. Nomura and J. Watanabe: ASTM STP755, (1982), 383.
- (10) W. E. Erwin and J. G. Kerr: WRC Bulletin, **275**(1982).
- (11) W. P. McNaughton, R. H. Richman and R. I. Jaffee: J. Mat. Eng., **13**(1991), 11.
- (12) 田中泰彦, 東 司, 石黒 徹, 池田保美, 吉田 一, 舟崎光則, 土屋勝弘, 村井悦夫, 塚田尚史: 日本製鋼所技報, **45**(1991), 10.
- (13) W. P. McNaughton, R. H. Richman and R. I. Jaffee: J. Mat. Eng., **13**(1991), 28.
- (14) 藤田利夫: 火力原子力発電, **42**(1991), 1485.
- (15) 東 司, 田中泰彦, 石黒 徹, R. J. Jaffee: 材料とプロセス, **3**(1990), 1874.

図8 3.5NiCrMoV 低合金鋼のスーパークリーン化とクリープ破断強度。