

技術解説

Technical Review

産業機械分野

依田朋文*¹, 大矢耕二*², 神谷輝明*¹

Industrial Machine Field

Tomobumi Yoda, Kouji Oya, and Teruaki Kamiya

Synopsis

Daido Steel Co., Ltd. has manufactured in many variety of products rather than products for the automobile with an advantage of our integrated steelworks as a special steel supplier.

In field of industry, there are typical industries of Electric Power Plant and transportation. Many varieties of forging products are implemented in those fields and among those industries, there are not mutual relations but considering of population increase and global environmental problem worldwide in long term basis, those industries are realized in indispensable develops. However, low grade of special steel products have faced to change for global procurement in these days and the procurement of them has been shifting into developing nations who has a low cost work force. In developing technology, plastic, ceramic or complex materials are taking over steel material in a recent trend. Today, our non-automotive departments recognize to satisfy the markets higher requirment in any field is a key to survive in steel markets.

We introduce several cases that we work with our customers for developing new materials which are not specified in general standards to meet particular specification in the industrial markets as follows.

1. はじめに

大同特殊鋼(株) (以下、当社という)では、自動車以外の分野に対しても特殊鋼の一貫メーカーとしての特長を生かしてさまざまな製品を製造している。

一口に産業機械分野といっても幅広く、発電機関連・プラント関連・輸送機器関連などさまざまな機器が使用されており、それぞれ個々の関連性はあまり無いが、人口増加や地球環境問題などを鑑み世界規模・長期的に見ると、今後成長する分野と考えられている。しかし、低グレードな特殊鋼部品の調達はグローバル化しており安価な労働力が供給される発展途上国にシフトしつつある。またプラスチックやセラミックスあるいは複合材料など金属以外の素材も積極的に活用される傾向にある。当社の非自動車関連部門としても、より高度な要求に答えられるような機能を付加することが、将来生き残るための課題であると考えている。

ここでは、産業機械分野で使用されている特殊鋼の中で、個別の要求を満足するべく客先との共同開発などを通して一般規格にない素材を製品化している事例を抽出して解説する。

2. 発電機関連

産業を発展させ、快適な生活環境を整える上で安定した電力供給は不可欠な要素である。特に最近では発展途上国の電力需要が増加しており、発電プラントの導入が盛んである。化石資源、特に石油の枯渇などの懸念から、石炭火力発電プラントの導入が積極的におこなわれているが、地球環境の問題によりCO₂排出削減が強く叫ばれ、蒸気条件の高温・高圧化による高効率化が図られている。現在では600℃級の超々臨界圧(USC:Ultra Super Critical)プラントまで実用化が進み、材料開発もこの技術発展に大いに貢献している。今後も更なる高温化が期待されており、700℃級、750℃級(A-USC:

2008年11月10日受付

*1 大同特殊鋼(株)素形材事業部 (Forging Products Div., Daido Steel Co., Ltd.)

*2 大同特殊鋼(株) EST 事業部 (EST Div., Daido Steel Co., Ltd.)

Advanced-USC) 蒸気タービンの開発が開始された。

一方、高効率化を目的に、蒸気タービンと高温ガスタービンを組み合わせた複合発電（コンバインドサイクル発電）プラントも実用化され、発電プラントのスタンダードシステムとなりつつある。

ガスタービンの高温化技術も高効率化に大いに寄与していくものと推測される。また、原子力発電もCO₂削減の面からは、注目すべき発電手段であり、安全性を確保しながら、増設されていくものと考えられる。

2. 1 蒸気タービン部品

蒸気タービンの主機は蒸気の入口である主蒸気止め弁、蒸気加減弁、動力発生部である翼列およびこれを収納するタービン車室、蒸気の熱エネルギーを回転動力に変換するタービンロータ、これを支持する軸受と軸受台などからなっている。

タービンロータの材質は、1970年代に確立された566℃の超臨界プラント以来、12Cr鋼が使われており、600℃級のUSCプラントにおいても12Cr鋼を改良して耐熱性を高めた材質が使用されている¹⁾。700℃超級のA-USCプラントに対する研究では、12%Cr鋼や改良12%Cr鋼ともにこの高温域には限界があり、高強度・オーステナイト鋼いわゆるNi基超合金が必要と考えられている。当然、合金設計・溶解技術・鍛造・熱処理技術とともに、より高いレベルの製造技術が要求される。当社でも三菱重工業(株)と共同で、低熱膨張のオーステナイトNi基超合金(LTES700R)の開発を進めている。一般

的にオーステナイト系合金は、12%Cr鋼と比較して熱膨張係数が大きいので、機器のシール性に課題があると考えられているが、開発中のLTES700Rは耐熱性を維持させつつ、膨張係数を抑制した画期的な超合金といえる。Fig.1にその熱膨張係数を示す²⁾。

タービンブレードについても、タービンロータの材質と同様、蒸気温度の高温化に対応するべく改良が進められてきた。当社も三菱重工業(株)と共同で、改良12Cr鋼をベースとした3%Co添加の10%Cr鋼(MTB10A)を開発し、600℃級USCプラントに採用されている。さら

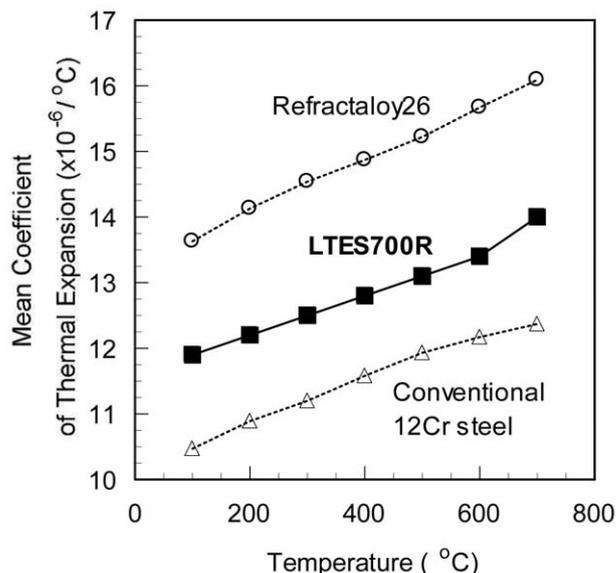


Fig.1. Mean coefficients of thermal expansion of LTES700R, 12Cr heat resistant steel and Refractaloy 26²⁾.

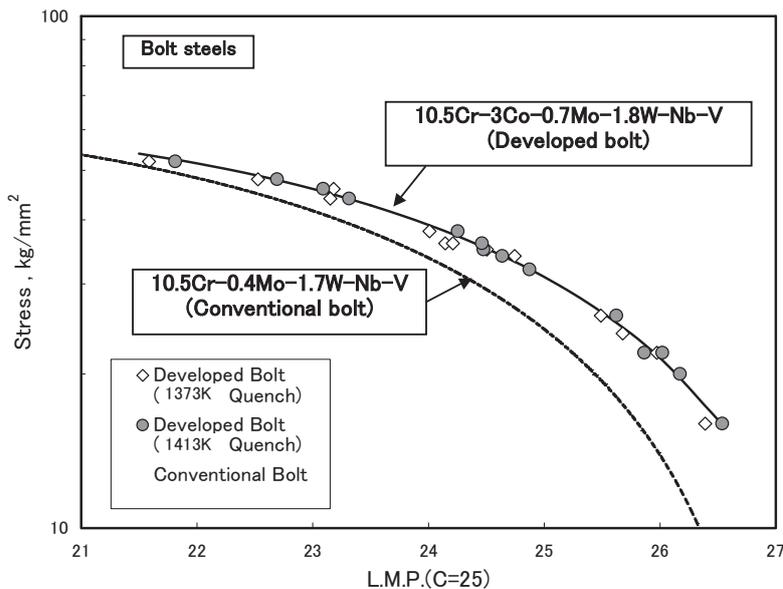


Fig.2. Relation between Larson-Miller parameter(C=25) and stress³⁾.

に、当社の特徴ある真空エレクトロスラグ再溶解（VSR）および高速四面鍛造機での製造技術を確立し、さらなる品質信頼性の向上を図っている。Fig.2 にクリープ破断試験の結果を示すが、従来材に比べ、温度換算で 30 K 向上している³⁾。

2. 2 ガスタービン部品

産業用ガスタービンの組立断面図の例をFig.3に示す⁴⁾。この図に示したようにガスタービンは、空気を約 1.5 MPa（15 気圧）に圧縮する圧縮部、圧縮した空気を燃料と混合させて燃焼させる燃焼機器部および燃焼させた高温高压のガスを膨張させて回転駆動力を得るためのタービン部から構成されている。このうち、圧縮機部の温度は、約 350 °C から 500 °C で使用されている。ブレード材およびロータ材のコンプレッサ部は、ともに耐熱性に加え韌性に優れた耐熱材料が使用されている。これに対して、タービン部は 1000 °C 以上の高温ガスにさらされるため、高温強度に優れた Ni 基耐熱合金が多く使用されているにもかかわらず、ロータ材は冷却構造にも左右されるため、耐熱合金や 12 % Cr 鋼、Ni 基超合金など、さまざまな材質が採用されている。

今後、タービン入口温度の上昇や冷却空気の削減など高効率化に伴って、ロータ（ディスク形状）の使用条件はさらに過酷になり、In718 に代表される高強度な Ni 基超合金の適用が拡大すると予測される。当社でも、大型鍛造品において欠陥や偏析のない均一で安定な組織が得られるように、溶解から鍛造・熱処理までのプロセス開発を推進している。DAINUS（Daido Numerical Process engineering System）を用いて、自由鍛造でのロータ（ディスク形状）製造におけるプロセスモデリングを確立し、要求される内質を満足するために必要な製造条件を予測することが可能になった。Fig.4 は、In718 の結晶粒度を計算するシステムフローであり、これを利用してロータ（ディスク形状）の自由鍛造について計算し、実鍛造で確認した結果が Fig.5 である⁵⁾。δ プロセスの最適化により、自由鍛造プレスで In718 のロータ（ディスク形状）を製造した場合においても安定的に結晶粒径を 22.5 μm 以下に抑える（ASTM No.8 以上）ことができるようになった。これらの結果も考慮し将来の Ni 基超合金の大型品を製造するべく、当社渋川工場に 7000 t の加圧力を持つ自由鍛造プレスを導入し、2008 年 4 月から稼働を開始している⁶⁾。

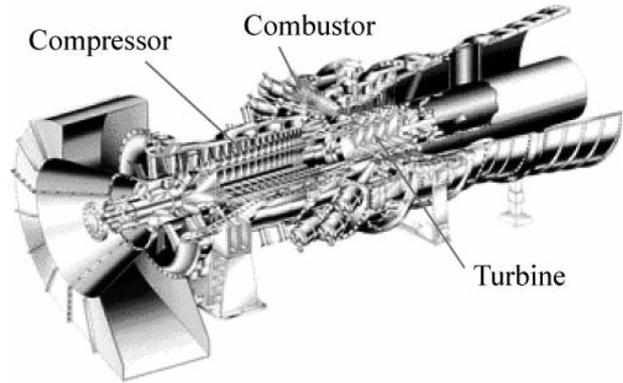


Fig.3. The structure of the Gas Turbine⁴⁾.

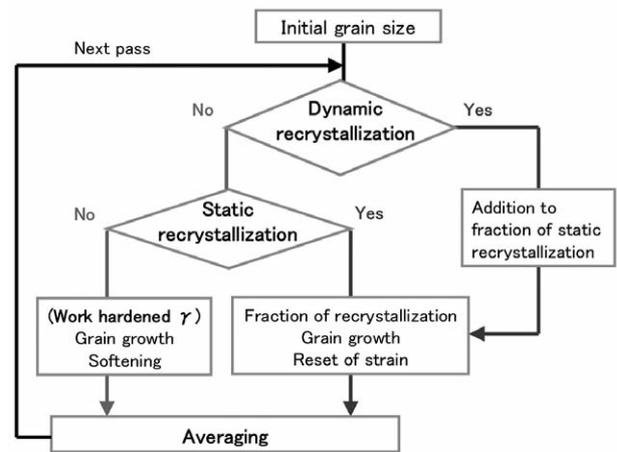


Fig.4. Flow chart of micro-structural prediction system of IN718(DAINUS-grain)⁵⁾.

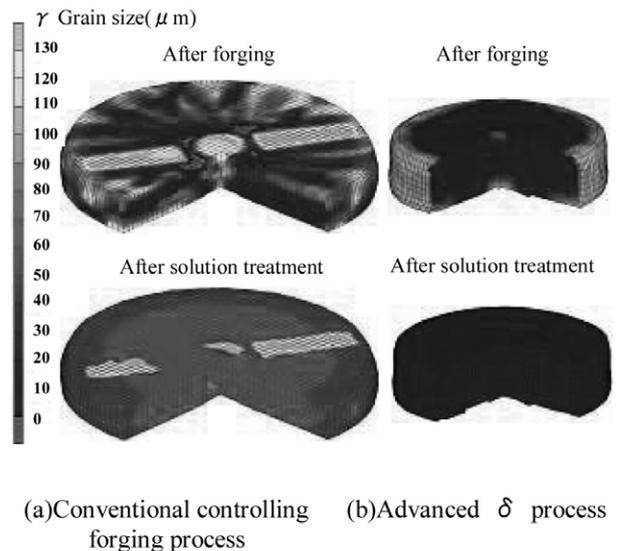


Fig.5. Grain size distribution prediction results in conventional controlled forging process⁵⁾.

3. プラント関連:エチレン分解炉用PPWクラッド鋼管EST

当社のプラズマ粉体肉盛溶接技術 (Plasma Powder Welding: 以下 PPW と略す)⁷⁾ を活用して、耐食性に優れたごみ焼却炉用スーパーヒーターチューブ (発電用水蒸気加熱ボイラーチューブ)⁸⁾、耐摩耗 FCC ノズル、EST (Ethylene Super Tube: 以下 EST と略す) などが実用化されている。

PPW 技術は、タングステン電極と被加工物である基材との間にプラズマアークを発生させ、このプラズマアークの中に粉末を投入・溶融させて肉盛溶接する技術である。この PPW 技術を「長尺管内面の全面肉盛溶接」に発展させ、Fig.6 に示す耐コーキング性、耐浸炭性に優れた、エチレン分解炉用 PPW クラッド鋼管 EST を商業炉に導入している。

エチレン分解炉では、加熱された炉内に、ラジアントチューブを通し、ナフサ、エタンを原料として投入し、分解反応を行わせている。この分解工程では固形炭素 (コーク) が発生、管内面に堆積し、管の熱伝達率を低下させ、炉の連続運転を妨げ、エチレン歩留りを低下させている。また、高温ではコークに起因して、精製炉管への浸炭が急速に進行し、管の残寿命を著しく減少させている。このコークの発生を抑制し、炉の連続操業時間の延長を図ること、精製炉管への浸炭抑制により精製炉管の長寿命化を図ることが長年の課題である^{9)~11)}。コークの生成については、金属触媒作用に起因する

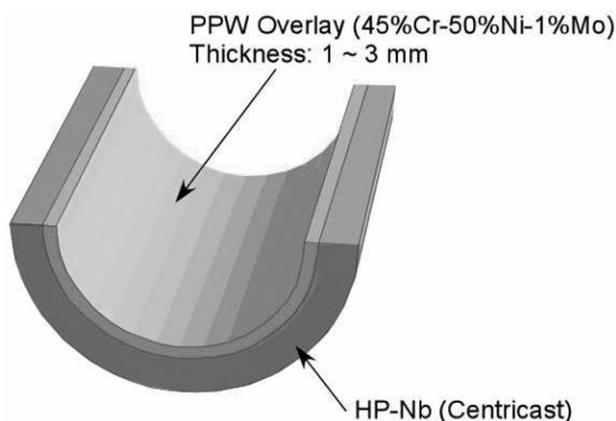


Fig.6. PPW overlaid tube construction.

ものと、熱分解に起因するものとの2種類があり、[Fe]、[Ni]、[Co]などの元素が、強い金属触媒作用を持つことが知られ、多くの研究が行われている^{12)~14)}。この金属触媒作用に起因したコークを抑制するために、Cr酸化皮膜などによる耐コーキング性および耐浸炭性の改善が提案されてきた^{15),16)}。

このコークは、管内面の [Fe] を含んだ酸化物が触媒になって発生するため、触媒となる [Fe] を含有しない 50Cr-50Ni 系の成分がコークの抑制に有効であることは知られている。そこで、耐熱遠心鑄造管の内面に、50Cr-50Ni がベースの粉末を PPW 内面肉盛溶接し、管内表層に [Fe] を含まない Cr 酸化物を形成することにより、触媒コーク発生の抑制および母管への浸炭阻止に優れた EST を開発・実用化した。

当初エチレン分解炉用 EST は、ナフサ原料のエチレン分解炉に導入され、浸炭抑制による分解炉管の長寿命化を達成した。しかし、ナフサ原料の分解において熱分解に起因するコークが生成しやすいため、コーク発生の抑制による炉の連続運転時間の延長の効果は少なかった。

そこで現在では、エチレン分解炉用 EST は、熱分解に起因するコークの発生が少ないエタン原料のエチレン分解炉を中心に導入され、国内・海外数社にてその性能を評価中である。ここでは、現時点で得られたエチレン分解炉用 EST の耐コーキング性能、エチレン歩留り改善効果および耐浸炭性能について解説する。

3. 1 商業用エチレン精製炉に導入されたESTの性能

EST を導入したエチレン分解炉の模式図を Fig.7 に示す。Furnace A は Coil A ~ D の4コイルで構成されており、EST は Coil C と Coil D の出口側の2パス (全体の20%適用) に設置され、従来の耐熱遠心鑄造管 35Cr-45Ni を使用した Coil A と Coil B と同一の操業条件下で比較された。Furnace B では EST は Coil の半分 (全体の50%適用) に設置され、同一型の Furnace C (従来の耐熱遠心鑄造管 35Cr-45Ni) と同一の操業条件下で比較された。

(1) 連続操業時間 Run Length の評価

管内面へのコーク堆積量が多くなると、熱伝導率が低下するため、炉管表面温度 TMT (Tube Metal Temperature) の上昇傾きは高くなる。また、管内径は小さくなり、原料は流れにくくなるため、差圧 ΔP の

上昇傾きも高くなる。多くの場合、Run Lengthは、このTMTあるいは ΔP によって制限される。Furnace AのRun LengthはTMTが上限値(1080℃)に達すると、Furnace BとCのRun Lengthは ΔP が上限値(0.15MPa)に達すると、操業を止めてデコーキング作業を行う。

Furnace Aについて、各RunのTMTの推移をFig.8に示す。縦軸はTMTを表す。ESTが導入されたCoil CとCoil DのTMTは、従来の遠心鑄造管のCoil AとCoil Bに比べ低く、TMTの上昇傾きの小さいことが確認された。ESTの管内のコーク堆積量は、従来の耐熱遠心鑄造管に比べ少なかったため、ESTのTMTは低く、上昇傾きは小さかったと考えられる。

Furnace BとFurnace Cについて、各Runの ΔP の推移をFig.9に示す。縦軸は ΔP を表す。ESTが導入されたFurnace Bの ΔP の上昇傾きは、従来の遠心鑄造管のFurnace Cに比べ小さいことが確認された。その結果、Furnace BのRun LengthはFurnace Cに比べ2倍に延長された。ESTの管内のコーク堆積量は、従来の耐熱遠心鑄造管に比べ少なかったため、ESTの ΔP の上昇傾きは小さかったと考えられる。デコーキングを繰り返すことによって、 ΔP の上昇傾きは小さくなる傾向が認められる。後述するように、これはデコーキング処理時にESTの自己修復機能(Self Healing Effect)により[Fe]を含まないCr酸化層が安定化し、コークの抑制効果が

高まったと考えられる。

(2) エチレン歩留りの評価

管内面へのコーク堆積量が多くなると、管内径が小さくなり、管内流速が上がるため、在炉時間(反応時間)は短くなり、エチレン歩留りは低下すると考えられる。

エチレン歩留りの推移について、Furnace Aの推移をFig.10(a)に、Furnace BとFurnace Cの推移をFig.10(b)に示す。Fig.10(a)は縦軸に操業開始時点のエチレン歩留りを100として、Runの間におけるエチレン歩留りの推移を指数で表した。ESTにおけるRunの間におけるエチレン歩留りの低下傾きは従来の耐熱遠心鑄造管を使用した場合に比べ小さいことが確認された。Fig.10(b)は、縦軸はエチレン歩留りを表し、絶対値評価とした。ESTにおけるエチレン歩留りは従来の耐熱遠心鑄造管に比べ1-2%の向上が確認された。ESTの管内のコーク堆積量は少ないため、コークの堆積に伴う管内流速の上昇=在炉時間短縮は抑制され、Runの間におけるエチレン歩留りの低下は減少したと考えられる。

3. 2 ESTの管内表面Cr酸化と耐浸炭性

ESTの実炉性能を確認するため、6年間が経過した時点で、抜管によるESTサンプルの採取を実施し、管内表面Cr酸化および耐浸炭性を評価した。

(1) 管内表面Cr酸化の評価

6年間使用したESTのコーク除去(デコーキング)後

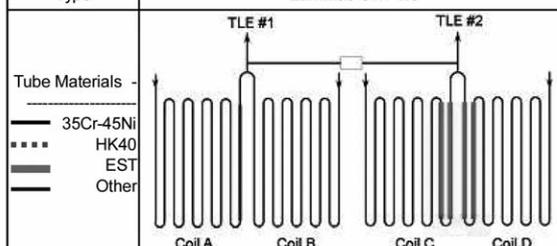
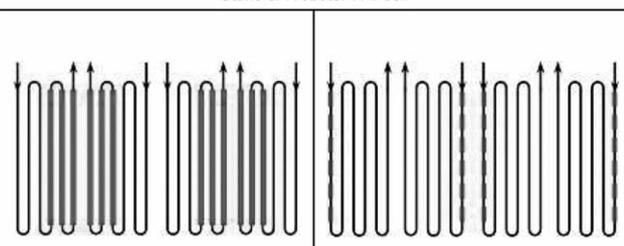
	Furnace A	Furnace B	Furnace C
Type	Lummas SRT 1.5	Stone & Webster WV coil	
Tube Materials			
Tube ID (where EST is applied)	139.2mm (5.48")	95.3 mm (3.75")	
Feed	ethane, 11.0 - 12.0 ton/hr	ethane, 5600 sm ³ /hr	
COT	825 - 830 deg.C (1517 - 1526 F)	840 deg.C (1544 F)	
Conversion	~ 60%	~ 60%	
R/L Limit	TMT 1080 deg.C (1976 F), QOT 380 deg.C (716 F)	ΔP 0.15 MPa	
Typical R/L	80 days	30 days	
EST Application	2/10 pass (20%)	3/6 pass (50%)	None (reference)

Fig.7. Furnace configurations and process conditions for evaluation of PPW overlaid tubes.

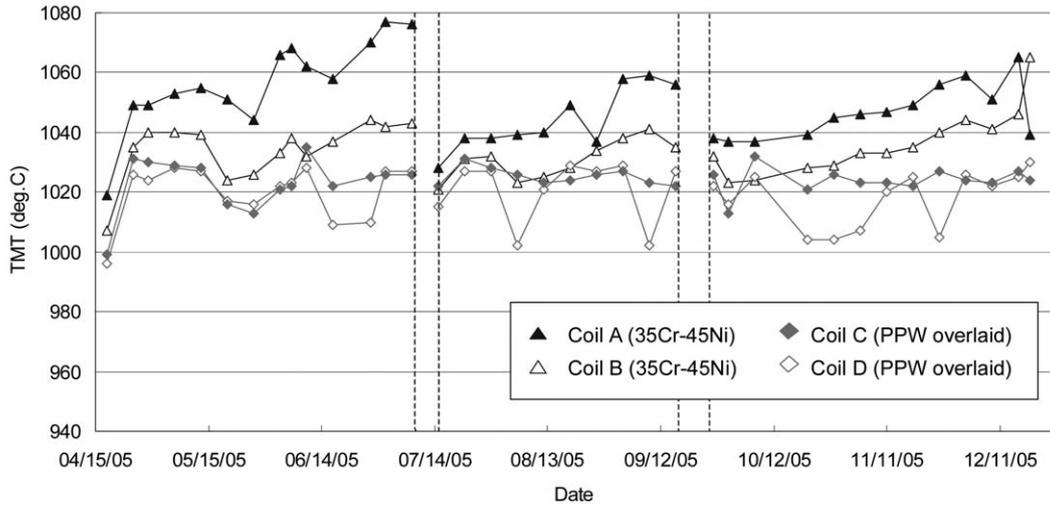


Fig.8. TMT trend of 4 coils in Furnace A.

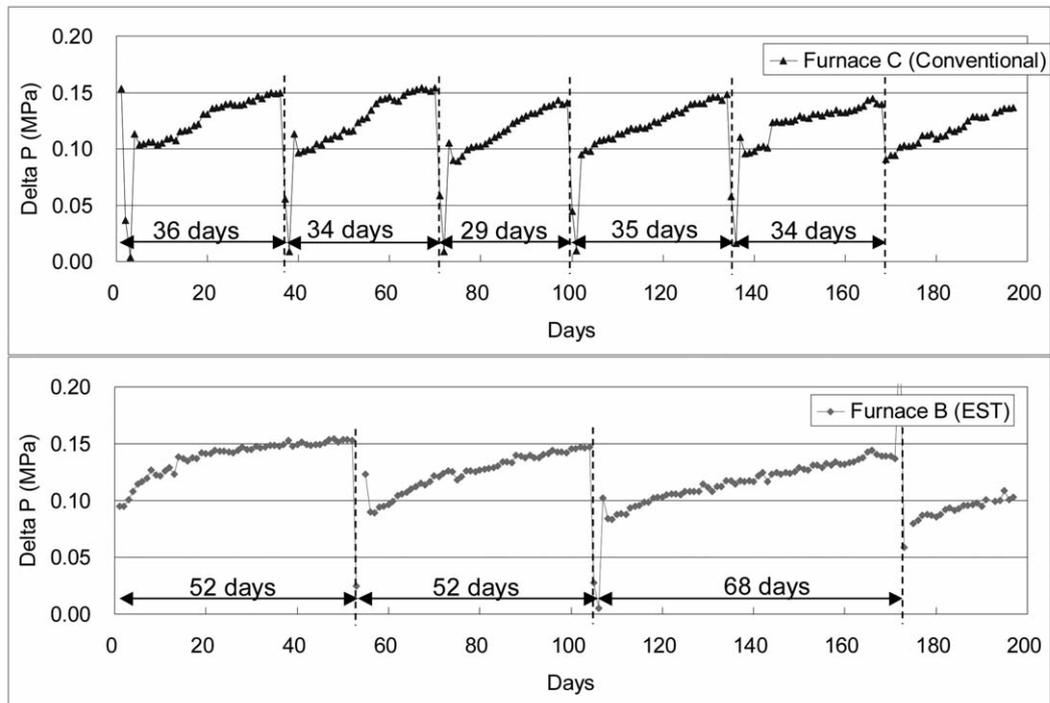


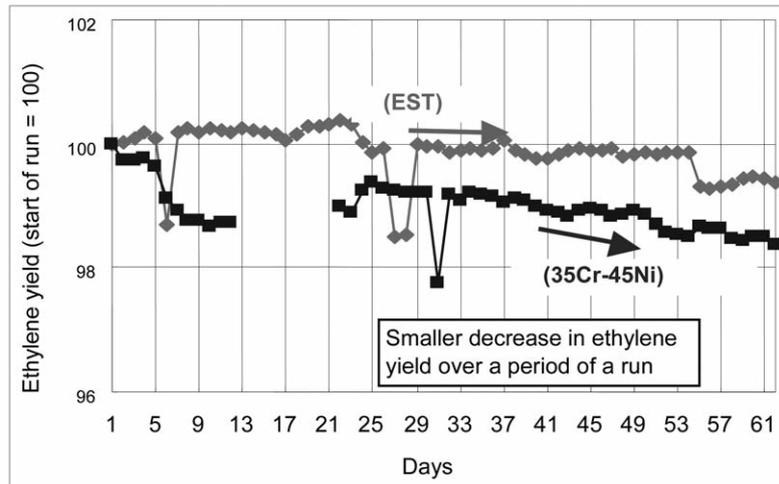
Fig.9. Trend of pressure drop across the radiant coils in Furnaces B and C.

の管内表面には、摩耗などの損傷はなく、ESTの管内表面には緑色を呈するCr酸化層が確認された。

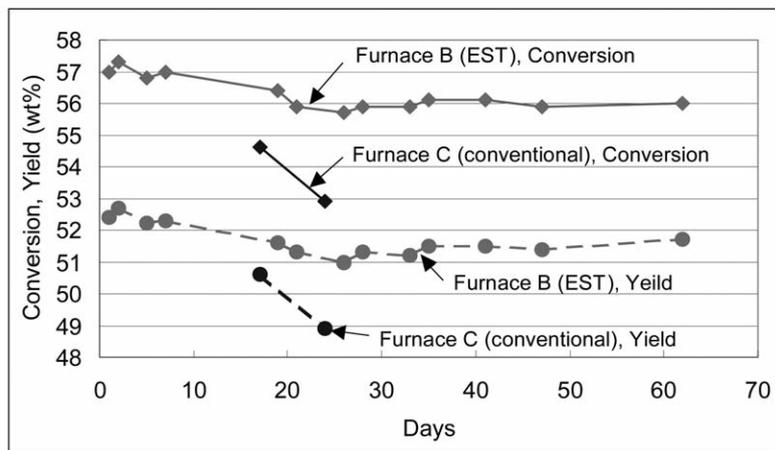
典型的なデコーキング後の管内表面層断面における各元素の濃度分布状態をFig.11に示す。内管表面の酸化層は[Cr]と[O]のみであり、[Fe]は含まれていない。6年間使用したESTの内管表面には[Fe]を含まないCr酸化物が形成されており、6年間の使用後も管内における触

媒コークの発生・堆積を抑制する機能が維持されていると考えられる。

[Fe]を含まないCr酸化層を形成するには、Cr酸化層の直下に25%以上のCr含有が望ましいと指摘されている^{17)~21)}。6年間使用したESTについて、酸化層直下のCr濃度は約30%あり、酸化層が損傷を受けた場合にも[Fe]を含まないCr酸化層は形成されていたと考えら



(a) Furnace A



(b) Furnaces B and C

Fig.10. Ethane conversion and ethylene yield:(a) Furnaces A, (b) Furnaces B and C.

れる。ESTはデコーキング処理時の自己修復機能 (Self Healing Effect) により、6年間にわたり [Fe] を含まない Cr 酸化層を形成および維持し、コークを抑制してきたと考えられる。

(2) 耐浸炭性の評価

一般に耐熱遠心铸造管においては、浸炭は管内面表面側から管外面表面側に向かって徐々に進行し、母管の脆化およびクリープ強度低下につながり、管の残寿命は短くなると考えられる。一方、ESTにおいては、浸炭は管内面表面側の PPW 層内に進行するが、[C] の上昇は PPW 層内に止まり、母管側への浸炭の進行は認められ

ず、見掛け上、PPW 層内で浸炭が停止するという浸炭阻止現象 (Dam Effect) が報告されている^{17)~22)}。

6年間で使用したESTの断面における各元素の濃度分布を Fig.12 に示す。6年間で使用したPPW層内に [C] の上昇は確認されるが、母管側への浸炭の進行は認められない。6年間にわたり PPW 層の耐浸炭効果 Dam Effect が確認された。EST 導入により炉管寿命の大幅な向上が期待できる。

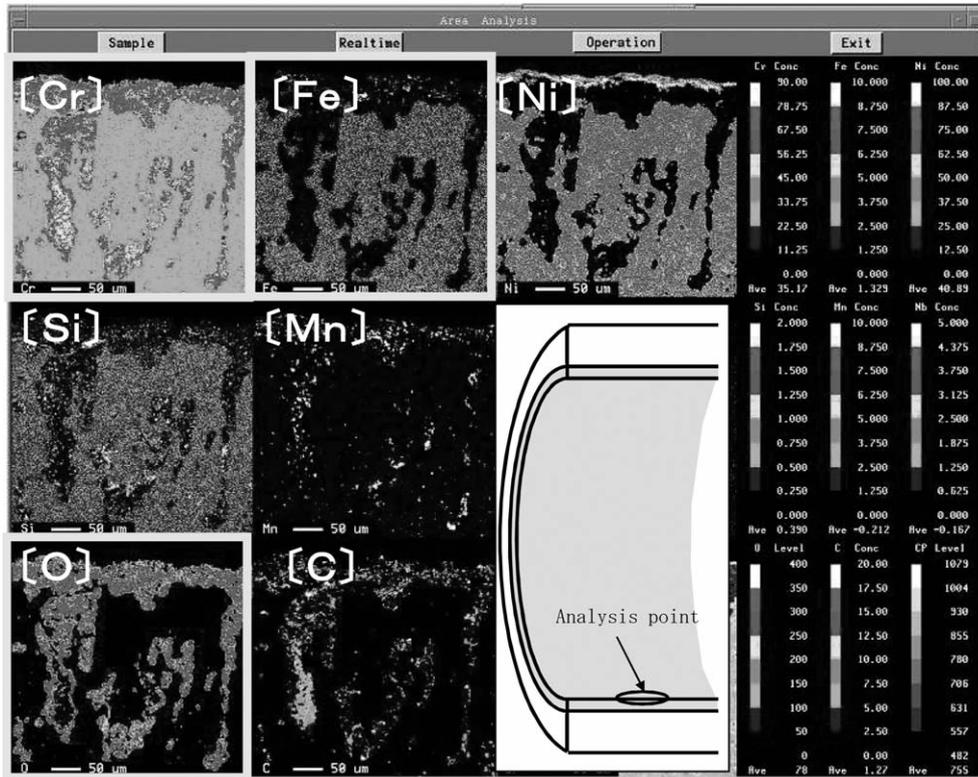


Fig.11. Profile of elements distributions of oxide layer in EST by EPMA.

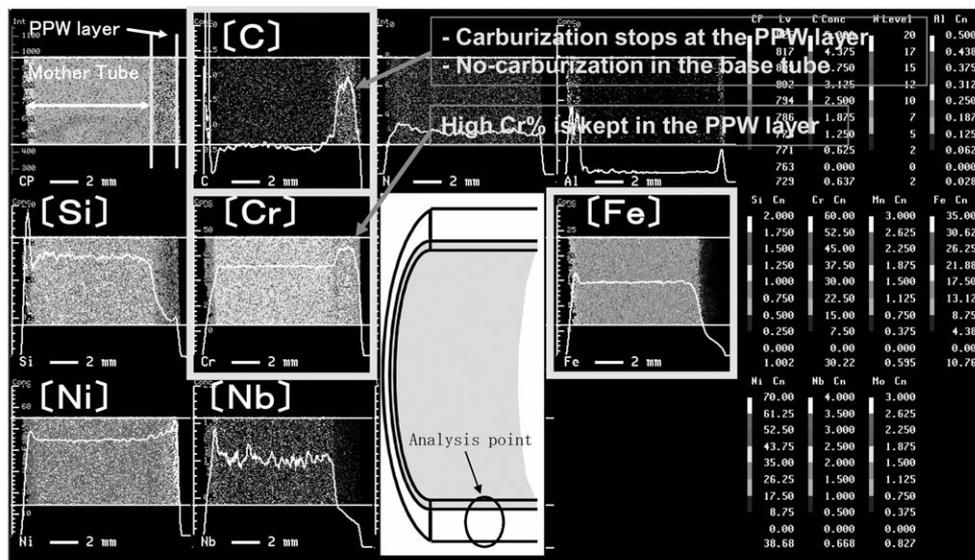


Fig.12. Profile of elements distributions of cross section in EST by EPMA.

4. 輸送機器関連：航空機用エンジンシャフト

当社は古くから、旧防衛庁関連向けに航空機エンジン・機体・ロケットなどの部品素材を製造してきたが、1985年に株式会社 IHI から V2500 エンジン低圧タービンシャフト鍛造品を納入されたことを機に、本格的に民間航空機向け素材の提供を開始した。

シャフト素材以外にも航空機ベアリング用素材 M50 や、株式会社 IHI と共同開発した耐熱チタンなど、過酷な条件下で使用される航空機関連部材を数多く提供している。

その中でも、素形材事業部において世界商品の一つと位置付けている航空機用エンジンシャフト素材について紹介する。

4. 1 エンジンシャフト素材製造の現状

現在までに、世界4大航空機エンジンメーカー（①1991年ゼネラルエレクトリック社〔以下GE〕、②1992年プラットアンドホイットニー社〔以下PW〕、③1998年ロールスロイス社〔以下RR〕、④2004年スネクマ社）からの製造認定、またAS9100やNADCAP（National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program；国際特殊工程認証制度）など、世界のマーケットで不可

欠な認定を取得しており、V2500をはじめとした大・中型旅客機用エンジンシャフト素材を、現状では月産130本程度生産している（Table 1）。

4. 2 航空機用エンジンシャフトに求められる性能

(1) 一般的な要求特性

航空機用エンジンシャフトはエンジンの中心部に位置しており（Fig.13）、タービンの動力を前方のファンやコンプレッサーに伝える伝動媒体としての素材特性が要求される。

そのため、長時間運転中、低温部から高温部にわたって高速回転で、高トルク伝達に耐える耐熱性や高温・疲労強度・靱性が要求される。それ故に、その製造には高い信頼性を確保する必要があり、高纯净度および偏析のないクリーンな鋼が不可欠となる。

(2) 環境変化に伴うシャフトへの要求変化

エンジン前方にあるファンのみを通過し、コンプレッサーに吸い込まれない空気量 F を、コンプレッサーに吸い込まれる空気量 C で割った値 F/C をバイパス比 (Bypass Ratio) という。1970年代の航空機に搭載されたエンジンはバイパス比が5程度であるが、最新のB787用エンジン^(注)(GE製GEnx, RR製Trent1000)ではバイパス比は10程度である。

一般にバイパス比が高いほど燃費がよく低騒音である

Table 1. Our Engine shafts' track record.

		GE		P&W		RR		CFM		IAE	
Boeing	B-737							CFM56-3C,7B	○		
	B-747	CF6-80C2		PW4000	○	RB211-524	○				
	B-757			PW2000		RB211-535	○				
	B-767	CF6-80C2		PW4000	○	RB211-524	○				
	B-777	GE90	○	PW4000	○	TRENT800	○				
	B-777-LONG	GE90-115B	○								
	B-787	GENX	○			TRENT1000	○				
	MD-11	CF6-80C2		PW4000	○						
MD-90									V2500	○	
Airbus	A300	CF6-80C2		PW4000	○						
	A310	CF6-80C2		PW4000	○						
	A319							CFM56-5B	○	V2500	○
	A320							CFM56-5B	○	V2500	○
	A321							CFM56-5B	○	V2500	○
	A330	CF6-80E		PW4000	○	TRENT700	○				
	A340					TRENT500		CFM56-5C	○		
	A380	GP7200				TRENT900					

が、近年の燃料費の高騰や騒音問題を背景にバイパス比の向上が進んでいる。いきおいファンを駆動させるシャフトに対する要求も一層強まってきている。

(注)

B787に搭載されるGE製、RR製エンジンシャフトとともに、当社がメインサプライヤーとして世界に供給している。

Courtesy of Japan Aero Engine Corporation

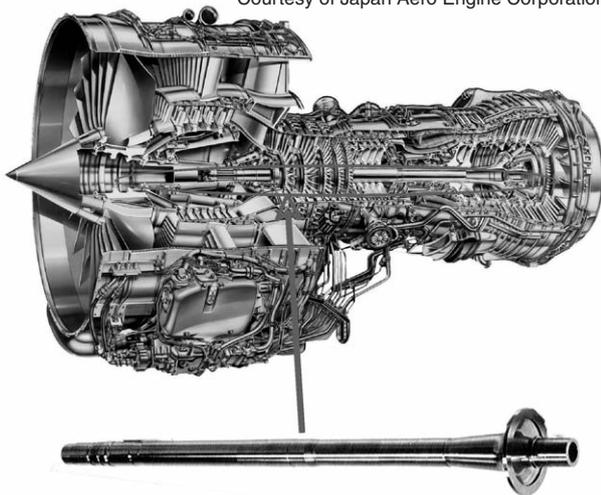


Fig.13. Cross section of V2500 Engine and LPT shaft.

4. 3 新マルエージング鋼GE1014の開発

当社の技術力を象徴すべきエンジンシャフト素材として、推力世界最大級のジェットエンジンであるGE90-115BBシャフト (Fig.14) が挙げられる。当シャフトにはGE、株式会社IHI、当社が共同開発した新マルエージング鋼 (GE1014) が採用されている。直径約3メートルのファンを、直径百数十ミリ程度の当シャフトで回転させるのである。

その最大の特徴は、①高清浄度化による高い疲労強度 (Fig.15) ②2200 MPa (約320 KSi) 以上の高強度・高靱性材である (Fig.16)。そのためには、VAR・ESRの2次溶解プロセスが重要となる。

また、鍛造では大型プレスと高速四面鍛造機のコンビネーション鍛造を採用している。さらに熱処理においては、曲がりや歪みを極力少なくするために堅型熱処理炉が使用されている。材料開発力および溶解から検出出荷までの一貫した製造保証体制が評価され、当エンジンシャフトの素材は、GE90-115Bおよび先述のGENxエンジンにも採用されている。



Fig.14. Outside of GE90-115B LPT Shaft.

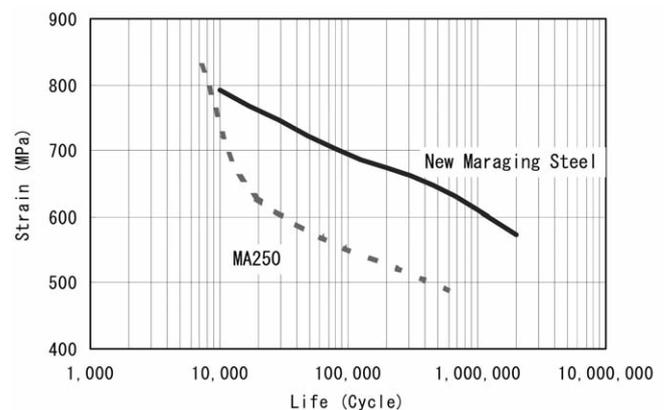


Fig.15. Low Cycle Fatigue.

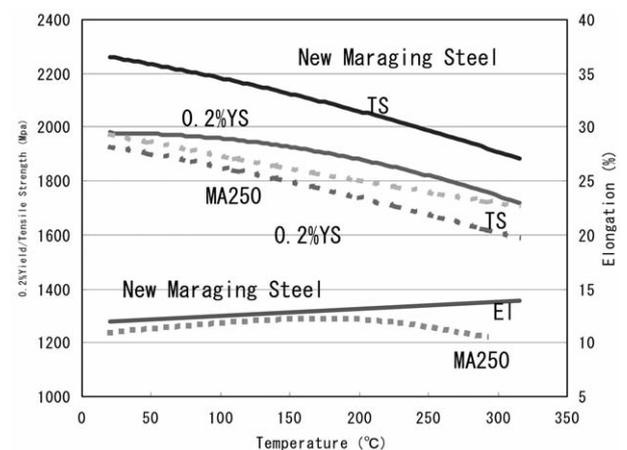


Fig.16. Strength and Elongation.

4. 4 今後の方向, 発展

今後、環境問題や燃料高・新興国の台頭によるボーダレス化などをキーに、また航空機の約20年ごとの買替え時期とも重なり、民間航空機製品の需要はさらに拡大すると考えられている (Fig.17)。

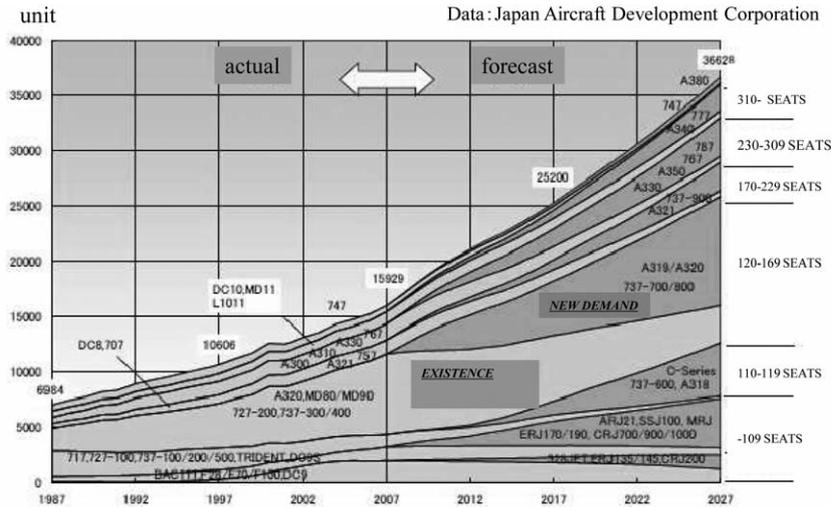


Fig.17. Worldwide forecast for commercial Jet Fleet.

製造拠点である当社浜川工場のこれまで培われてきた技術と新鋭設備で、エンジンメーカーや当社研究所ともタイアップしながら、今後さらに高まるエンジンシャフト素材への要求に応え、一貫した生産ラインで世界のエンジンシャフト供給基地としての地位を確固たるものしたいと考える。

5. むすび

以上、産業機械の分野で使用されている特長的な製品の事例について述べてきた。いずれの場合も、客先の高度な要求に対応するべく、合金設計から製造プロセスまで一品一様で対応した結果、生み出すことができた製品である。今後も当社の強みである「特殊鋼の一貫製造プロセス」を駆使し、さらに高度な付加価値の創造を目指してゆく。

(文 献)

- 1) 角屋好邦：特殊鋼,50 (2001) ,12,19.
- 2) S.Kurata, S.Ueta, T.Noda, H.Sekiguchi, H.Sakuma, R. Yamamoto, Y. Kadoya, T.Nakano, Y.Tanaka and R.Magoshi:IFM2008, 17 (2008) , 472.
- 3) 古瀬泰輔, 佐久間仁, 平川裕一, 角屋好邦：電気製鋼,75 (2004) , 121.
- 4) 角屋好邦：耐熱金属材料 123 委員会研究報告,44 (2003) ,3,215.
- 5) H. Yoshida, T. Hatta, T. Hironaka, S. Isogawa and H. Sekiguchi:Numiform2007, (2007) , 987.
- 6) K. Takada, K. Nakamura and T. Yoda :IFM2008, 17 (2008) , 148.
- 7) 加藤哲男, 竹内宥公：鉄と鋼,75 (1989) , 42.
- 8) 竹内宥公：電気製鋼, 67 (1996), 213.
- 9) 近藤洋：CIT Symposium 2000, Technical Paper.
- 10) 山内久雄：配管技術, 1 (1998), 1.
- 11) 森田五生：配管技術, 1 (1998), 12.
- 12) S. Straub, R. Krajak, H. J. Grabke：Materials and Corrosion, 50 (1999) , 622.
- 13) Lyle F.Albright, James C. Marek：Ind. Eng. Chem. Res., 27 (1998), 751.
- 14) Lyle F.Albright, James C. Marek：Ind. Eng. Chem. Res., 27 (1998), 755.
- 15) H.J.Grabke：High-Temperature corrosion and protection 2000, 395.
- 16) Steanson B. Parks, C.M.Scillmoller：AIChE Paper, 24b (1995) , 1.
- 17) 大矢耕二：配管技術, 9 (2004), 13.
- 18) T.Maeda, F.X.Terwijn：AIChE 2005, Technical Paper.
- 19) T.Maeda, F.X.Terwijn：NACE/CORROSION 2007, Technical Paper.
- 20) 大矢耕二, 前田利秀：電気製鋼, 78 (2007), 179.
- 21) Y.Yoshida, K.Ohya, F.X.Terwijn, T.Maeda,：AIChE 2007, Technical Paper.
- 22) K.Ohya, Y.Yoshida, F.X.Terwijn, T.Maeda, Y.Takizawa：2008 NACE East Asia Pacific Regional Conference & Exhibition Technical Paper.