

特別講演

□渡辺義介賞受賞記念

大型鍛鋼品の高信頼化と技術開発

Advance in Technologies toward the High Reliability Large Steel Forgings

大西敬三
Keizo Ohnishi

(株)日本製鋼所 相談役

1 緒言

火力原子力発電所、石油精製プラントなどのエネルギー産業プラントは、戦後のエネルギー需要の飛躍的な増大により大容量化、大規模化してきた。ロータシャフト、各種圧力容器はプラントの心臓部を構成する代表的鍛鋼製機器であるが、これらの高品質化・高信頼化なしには、プラントの大容量化は成し得なかったと言っても過言ではない。近年はスケールメリットの追求とともに、地球環境問題や新プロセスへの対応に向けて、技術開発、材料開発が続けられている。本報告では、大型鍛鋼品の高信頼化に向けての生産技術開発および材料開発について述べる。

2 エネルギープラントの大容量化と高効率化

大型鍛鋼品の市場は主として火力および原子力発電、石油精製などエネルギー産業の中核となる回転軸材および圧力容器であり、その技術開発は、日本の高度成長期におけるエネルギーの大量消費に併せた大型化時期、蒸気条件の高温／高圧化を介した高効率化時期、および地球環境問題と関連した新規プラントの登場とそれぞれ密接な関係を保ちつつ展開してきた。日本製鋼所が戦前から所有する10,000トン容量の水圧鍛造プレスが再び有効に活用され始めた時期は日本の高度成長のスタート時期と一致しており、Fig.1に示す国内の火力および原子力発電プラントの単基発電容量の年次推移と最大鋼塊重量の大型化は一对一の対応をなしている。火力・原子力発電の単基容量は1960年後期から1970年中期に大容量化が進み、タービンロータ軸材を製造するのに必要な鋼塊重量はそれぞれの節目で400t、500tから600tへの逐次大型化が図られ、現在では1,350 MWの国内最大出力を有するABWR（改良沸騰水型原子炉）プラントが運転を開始してい

る。これらの大容量化が一段落するとともに、近年は高い発電効率を求め超臨界圧から超々臨界圧への移行が指向されており、ロータ軸材のクリープ強さの向上を要求し、材料開発を大きく加速させている。一方、ガスタービンと蒸気タービンを複合化したコンバインドサイクルは、大型鍛鋼業界の市場にNi基スーパーアロイをも包含する趨勢にあり、大型鍛鋼技術の革新は今後ともエネルギー産業と関連して継続して進められるべき課題を含み、現状に至っている。

3 製造技術の推移

鍛鋼製品は鋼塊を鍛造し、熱処理、機械加工、検査の工程を経て製造されるが、大型化、高信頼化は、先進的な製造技術開発があってこそ達成されたものである。Fig.2には、日本製鋼所の製造技術変遷の概要を示した。以下、近年の鍛鋼製品の大型化および高信頼化に向けての製鋼、鍛練、熱処理技術開発を概観する。

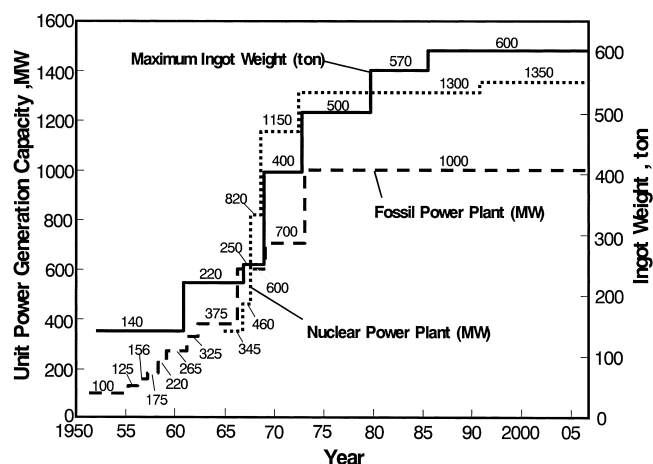


Fig.1 History of maximum unit output of power plants in Japan and maximum ingot weight in JSW

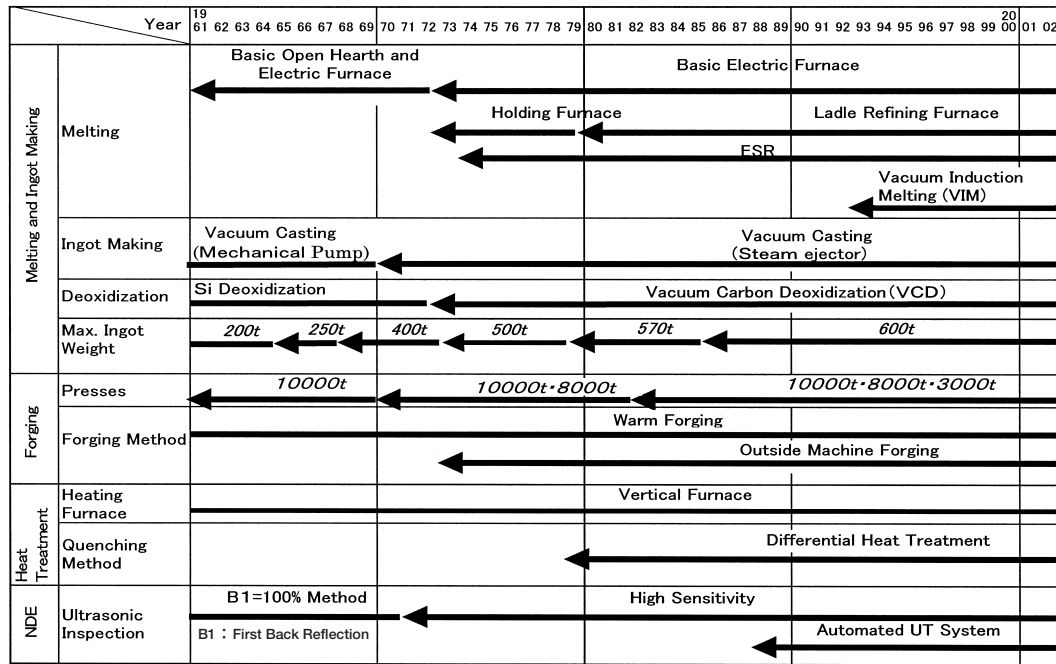


Fig.2 Development of production technologies in JSW

3.1 精錬・造塊技術

銅塊は大型化に伴い凝固速度が遅くなり、偏析、空隙の発生、非金属介在物の捕捉（砂疵）等が生じやすいが、これらの低減が大型化・高信頼化達成上の重要課題である。一方、精錬技術としては、欠陥生成の原因となるHやOなどガス成分の低減、製造中あるいは運転中の焼戻し脆化の原因となるP、S、As、Sn、Sb等の不純物元素低減による高純度化が、過酷な条件で運転される大型鍛鋼製品の高信頼化の要となる。

戦後の日本製鋼所における鍛鋼品製造は、平炉での精錬、大気中鋳込みによる造塊から始まったが、1960年の真空流滴脱ガス法の導入により、水素性欠陥問題の解決、塩基性電気炉などへの設備移行、真空カーボン脱酸（VCD：Vacuum Carbon Deoxidization）法の実用化が図られ、大型化、高信頼化に向けての基盤が確立された。VCD法は、低Si鋼を低酸素分圧下で鋳込んだ時に生じる鋼中のCとOの反応を利用し、酸素をCOとして排出することにより脱酸する技術であり¹⁾ 1970年に実用化されたが、低Si化は銅塊の凝固組織を緻密にしてマクロ偏析生成を抑制し、大型銅塊の均質化にも寄与した。また、Siは鋼の焼戻し脆化感受性を増大させる元素として知られるが、低Si化により焼戻し脆化感受性が軽減され、ロータ軸や石油精製用压力容器など高温運転機器の信頼性向上に大きく寄与している。1980年代には、超大型銅塊製造にも取鍋精錬が汎用化され、ガス成分や不純物元素がいっそう低減された。大型鍛鋼製品に適用される取鍋精錬プロセスでは、電気炉で溶解、酸化精錬された鋼は、リレ

ードルによるスラグカットを経て、取鍋に移されて還元精錬、アルゴンによる攪拌と真空処理による脱ガス、成分調整が行われ、流滴脱ガス法を適用して真空造塊される。原材料の厳選により精錬除去不能なAs、Sn、Sb、Cuなどの混入を防止し、取鍋精錬でP、S、ガス成分を低減し、さらに焼戻し脆化感受性を高めるMnを強度の酸化精錬により低減したスーパークリーン鋼の製造技術も1985年に確立された²⁾。Fig.3には、精錬技術の進歩の成果として、ロータ材の不純物元素量（P、S）の推移を示したが、高純度化に伴って強度、韌性、異方性などの改善が進み、健全かつ信頼性の高い製品が製造されている。

一方、造塊においては大型銅塊では凝固時間が長時間化し、偏析、空隙、砂疵などが生じやすく、これらの低減が課題となった。銅塊が大型になるほど頭部でのCの偏析が顕著となることが予測されるが、均質な成分分布の銅塊を製造するために、成分調整をした複数の炉の溶鋼を合わせて、偏析の少ない一つ的大型銅塊を製造する合わせ湯の技術（MP法）が実用化された。また、凝固時の空隙の発生を抑制し、マクロ偏析を低減するための銅塊ケースの最適形状設計や押湯条件の設定が進められ、VCD法の適用によるマクロ偏析の軽減と併せて、均質かつ良好な内部性状の大型銅塊を製造することが可能となった。Fig.4には、現在の世界最大重量の銅塊である600トン銅塊の造塊プロセスを示した。これらの技術開発には、偏析や空隙等の予測技術、凝固解析技術など品質予測技術の進歩の寄与も大きい。

3.2 鍛錬技術

鍛錬工程では鋼塊の粗大な凝固組織を拡散により消滅させ、鋼塊内部に形成される空隙を圧着し、健全な内部性状を達成しなければならない。日本製鋼所は最大10,000トンの荷重容量のプレス进行有するが、大型鋼塊の中心部まで空隙圧着に必要な応力、ひずみを付与するために、温間鍛錬法、超広幅金敷鍛錬法などの特殊な鍛錬技術を開発した。温間鍛錬法は、鍛錬温度に加熱した素材を表面温度800℃程度に冷却することにより、素材の内部と表層部に温度差をつけ、内外の変形抵抗が異なった素材を比較的小型の金敷で圧下することによって内部に大きな鍛圧効果を与える技術である³⁾。また、超広幅金敷鍛錬法はプレス上下の金敷の形状を最適化し、材料中心部に大きなひずみと高い静水圧応力を与え、空隙を圧着する技術である。現在は、塑性加工解析への有限要素法の適用が一般化しており、製品形状に応じた空隙圧着の条件

等を定量化することが可能となっている。

一方、压力容器の部材となる胴や鏡板等も大径化が進んだが、製品形状によってはプレス内での鍛錬作業が困難となったため、プレス機外で鍛錬作業を行う機外鍛錬技術が開発された⁴⁾。Fig.5には機外鍛錬の状況を示したが、压力容器胴、フランジ等のリングは機外鍛造により最大直径10 mの部材まで製造可能となり、原子力発電や石油精製压力容器部材の一体化、大型化が実現した。

3.3 熱処理技術

大型鍛鋼品の熱処理プロセスでは、熱処理時の質量効果、内部品質確認のための超音波探傷被検査性の向上、製品のニーズに応じた特殊熱処理方法などが検討されてきた。一体型低圧ロータのように胴径が3 m近い超大型軸材では、超音波探傷による被検査性を確保するために、オーステナイト化回

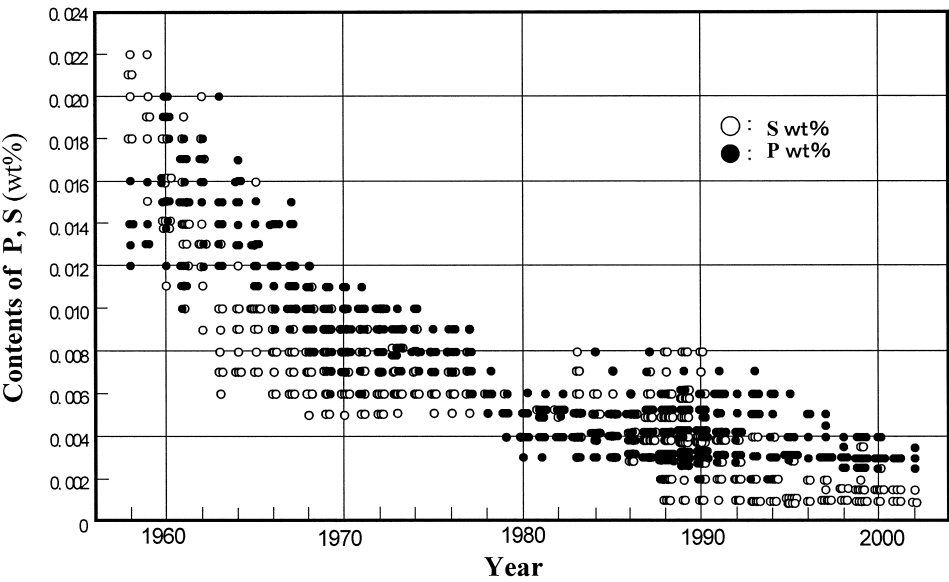


Fig.3 Change of P and S contents in turbine rotor forging steel

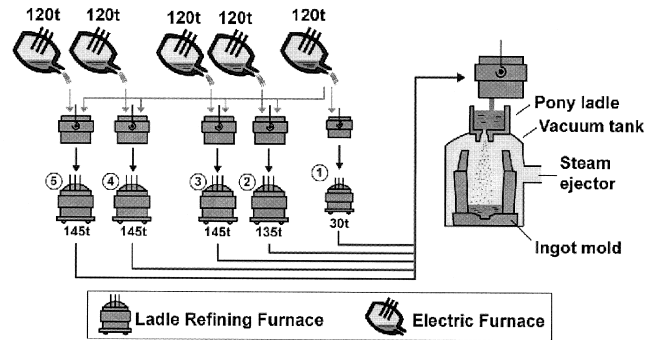


Fig.4 Ingot making of a 600 ton ingot



Fig.5 Appearance of outside machine forging

数、加熱温度などが最適化されている。タービン軸のような回転体では、振動、曲がりなどの運転時の問題を防止するために、径方向に均一な組織を得ることが重要であり、豎形炉での熱処理や回転熱処理が行われる。近年、コンバインドサイクル発電所で多用されている高低圧一体型ロータの製造では、高圧部に高温強度、低圧部に靱性という異なる要求性能を同一軸材で実現するために、高圧部を高温加熱後空冷し、低圧部を比較的低温から水冷する偏差加熱および偏差焼入れ技術が開発、実用化された⁵⁾。現在は、熱処理により付与される品質特性を解析により精度良く予測することが可能となっており、熱処理の計画における品質予測技術の役割は大きい。

4 エネルギー機器のあゆみ

4.1 タービンロータ軸材

火力原子力発電プラントのタービンロータ軸や発電機軸は高温、高圧、高速回転といった過酷な環境で運転される代表的な大型鍛鋼製品であり、前述のとおり、高度経済成長期の飛躍的なプラント出力の増大に伴って機器は大型化してきた。

Fig.6に示す一体型低圧ロータは、代表的な大型発電プラント部材であり、日本製鋼所の世界最大重量の鋼塊は主として一体型低圧ロータ製造に供されてきた。低圧ロータの一体化は、プラント出力の増大のみでなく、焼ばめ型のロータや溶接型ロータで生じる振動問題、応力腐食割れなどの解決策として、高信頼化ニーズに応えたものである。1970年にドイツKWU社から、焼きばめ構造の大型ロータを一体鍛鋼化する提案があり、実現に向けてプロジェクト活動が進められ、翌年には400トン鋼塊から最大胴径2,950 mmの一体型低圧ロータが製造された。国内向けとしては、1979年に電源開発岡田原発電所向けに一体型低圧ロータの第1号機を納入し

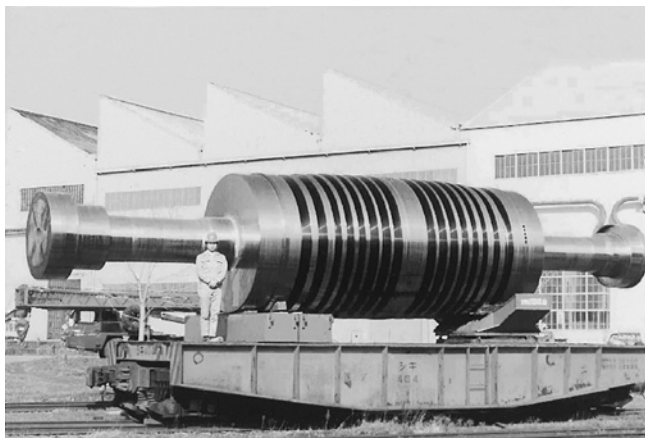


Fig.6 Appearance of a monoblock low pressure rotor forging

た。その後、一体型低圧ロータは国内外の大出力原子力発電所や火力発電所のロータとして採用されるようになっていく。製造のポイントは、均質かつ清浄な超大型鋼塊の製造、直径3 mにも及ぶ大胴径軸の内部までの十分な鍛錬効果の付与、軸材の材料特性の均質性と高靱性の達成、大胴径軸材内部の良好な被検査性の達成、残留応力の低減等であり、超大型製品製造における最高水準の技術が適用されている。信頼性保証の上では、軸材内部の欠陥に対する被検査性は重要であるが、繰り返し焼鈍処理の適用および化学成分適正化により十分に超音波透過性を高め、被検査性を確保している。1993年には、出力1、350 MWの東京電力柏崎6号、7号のABWRプラント向けに、完成時胴径が2,800 mmに及ぶ最大径の一体型低圧ロータが613トン鋼塊から製造された。一体型低圧ロータの2002年3月点での出荷数は180本に及び、安定した品質、信頼性を有する製品として定着している。

一方、発電効率向上を目的とした発電プラントの蒸気温度の高温化が進んだが、より過酷な環境下での運転に耐えるロータ軸が開発された。鋼中の不純物元素を極限まで低減したスーパークリーン鋼を素材としたロータもその一つである。低圧ロータ軸の多くは強度と靱性のバランスが良いことからNiCrMoV鋼で製造されているが、本鋼種は焼戻し脆化感受性が高く、実プラントでも運転上限温度が焼戻し脆化が進行しない温度に制限されており、焼戻し脆化感受性の低減が信頼性や性能向上などの面で重要課題であった。超々臨界圧発電プラントの蒸気温度の高温化に伴って、低圧ロータの運転温度も高温化し、焼戻し脆化問題への対応の必要性が顕在化した。焼戻し脆化感受性の低減には、脆化に寄与するP, As, Sn, Sb等の不純物元素やSi, Mn等の低減が必要不可欠であるが、鋼中のP, Sn, Si, Mn量(wt%)から計算される脆化感受性指数Jファクター、 $J = (Si + Mn)(P + Sn) \cdot 10^4$ を10以下にすることが必要との観点から、3章で述べた取鍋精錬技術により極限まで不純物元素およびSi, Mnを低減したスーパークリーンロータを開発した²⁾。1995年にはスーパークリーン化した超大型鋼塊より国内1,000 MW級火力発電所向け一体型低圧ロータを製造した。Fig.7は、スーパークリーン3.5%NiCrMoV鋼軸材の343から454℃の温度範囲での等温時効試験結果を1970年代初期に製造されたロータ軸材の10万時間等温時効試験結果と比較して示すが、スーパークリーン鋼は焼戻し脆化がほとんど認められないことが確認された⁶⁾。

蒸気温度の高温化により高・中圧ロータ材の高温強度要求もより厳しくなった。米国のゼネラルエレクトリック(GE)社は、超臨界圧発電プラントの蒸気温度566℃への対応として、CrMoV鋼に換えて12CrMoV鋼を採用したが、その後、我が国では、超々臨界圧(USC)条件の蒸気温度593℃への

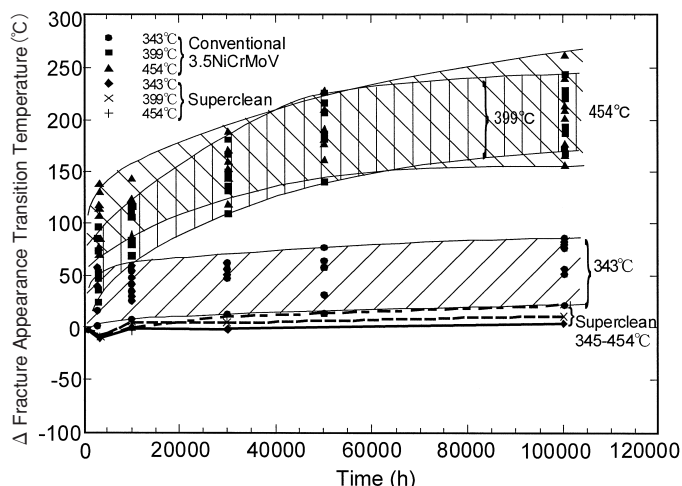


Fig.7 Isothermal aging test results of 3.5NiCrMoV steel

対応として改良12Cr鋼ロータが開発・製造され、現在ではフェライト鋼の極限とも言える蒸気温度650℃のプラントを目指した材料開発が行われている⁷⁾。650℃対応12Crロータの合金設計では従来12Cr鋼にW、Co、B等を合金化することによって高温強度の向上を図っている。多量の合金元素添加やBのようなコントロールの難しい合金元素を含有する鋼で均質なロータを製造するために、100トンESR (Electroslag Remelting) 設備を用いて試作が行われた。この高温用ロータ材のクリープ破断強度を示すとFig.8の如くなり、従来鋼と比較して破断強度は極めて高く、今後の超々臨界圧発電プラントの効率向上に大きく寄与するものと考えられる。

新設計プラント向けの部材として開発された特殊なロータ軸のひとつとして、高低圧一体ロータが挙げられる。このロータは通常2軸とされる高压タービンと低压タービンを一体化したもので、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電所で多用されるようになった。軸材は蒸気温度の高い高压側で優れた高温強度、胴径の大きい低压側ではブレードの長翼化と大胴径化によって増大する遠心力に耐える高強度・高靱性が要求され、一軸でこれら要求特性を同時に具備する必要がある。一般にクリープ強度と靱性は相反する特性であり、開発においては、双方に優れた特性を発揮させるための成分設計と熱処理方法がポイントとなった。最近の大容量先進コンバインドサイクル発電所 (ACC) 向け軸材としては、2%前後のCrのほかMo、V、Ni、W等を含有する低合金鋼が開発され、ロータは高压部と低压部で異なる特性を得るために偏差加熱、偏差焼入れ技術の適用により製造される。これらは高低圧一体型ロータの要求特性を十分に満足することが検証され、多くのコンバインドサイクルプラントで運転に入っている⁵⁾。

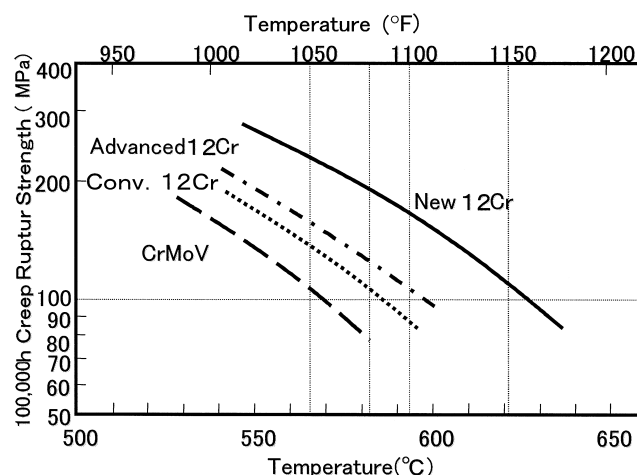


Fig.8 100000h creep rupture strength of high temperature rotor steels

4.2 原子力発電プラント

原子炉压力容器用の素材には、優れた強靱性、低い照射脆化感受性、良好な溶接性等が要求され、材質面でも絶えず高純度化による品質向上が図られてきた。また、日本製鋼所では、容器全体の溶接線を減じて容器の信頼性・安全性の向上を計り、供用期間中検査期間を短縮して原子炉の運転効率を増すために、RPV (Reactor Pressure Vessel) を始めとする压力容器の一体鍛鋼化に取り組んできた。1966年には板厚270mm鍛造リング材の試作評価が行われ、商用の原子炉向けとして1969年には、日本原子力発電敦賀1号機向けの鍛鋼フランジが製造された。1972年には压力容器の大型化に伴い必要となった大径の部材に対応するために、前述の機外鍛錬法を工業化し、外径5780mm、高さ2500mmの胴を400トン鋼塊から製造した。1980年には加圧水型重水炉 (PHWR) の胴フランジおよび蓋フランジを570トン鋼塊から製造した。1980年には、中性子照射を受ける加圧水型炉 (PWR) の炉心領域の胴を一体化し、同様に沸騰水型炉 (BWR) 用炉心領域胴も一体鍛鋼化した。炉心領域の胴は、中性子照射を受けるために、照射脆化に寄与するP、Cuなどの元素が低減されていることが望ましいが、原材料の厳選と取鍋精錬の適用で、高純度化が図られ、優れた靱性と低い中性子照射脆化感受性が実現されている。また、1985年から高速増殖炉実験炉“もんじゅ”の压力容器として、大型ステンレス鍛鋼部材を製造した⁸⁾。1991年には国内初のABWRである、東京電力柏崎6号、7号向けに、600トンのサイズの鋼塊から製造したFig.9に示す下部鏡板リングをはじめとする各種部材を納入し、大型となる改良型プラント部材の製造に対応している。

一方、鍛造鏡板は、大径の鍛造円板をプレスにより熱間加工して製造されるが、大径の鍛造板の機外鍛錬技術と熱間曲

げ成形技術の確立により、1979年に東京電力第二福島発電所2号機（1100 MW）BWRの広角下鏡が製造され、その後も国内外の多くのプラントに適用されている。また、PWRの蒸気発生機部材についても、溶接線を極力減ずるために一体鍛鋼化が進んでおり、形状的に成形の難しい、コンカルシエル、セカンダリーヘッド、プライマリーヘッド等の鍛鋼化も実現している⁹⁾。

4.3 石油精製用圧力容器

石油精製圧力容器は高温・高圧の水素環境で使用されることが特徴であり、高温での材料の経時変化および水素環境に対する抵抗性が重要な材料性質である。また、プラントの大



Fig.9 A component of ABWRPV made from a 600 ton ingot

容量化は圧力容器の大型化を要求してきた。直接脱硫・重質油分解用に使われるリアクターは肉厚300 mm、内径5 m、高さ30 mに及ぶ巨大な高压容器であり、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼に代表されるCr-Mo鋼鍛造リングを周継手溶接し製造され、硫化水素などの腐食環境に耐えるため容器内面はステンレス鋼の全面肉盛り溶接を行った構造となる。高压容器の設計はJIS、ASMEなどの各国毎規格に順じて行われるが、長期使用時の材料の経時損傷への配慮は規格に示されておらず、設計・製作者側が配慮すべき事項である。このため、運転時の焼戻脆性に起因した経時靱性劣化問題、クリープ割れ、水素侵食、水素脆性および硫化腐食などの時間依存性を有する高温損傷への対処法が材料側の研究対象となった。国内において大型石油精製圧力容器の製造に本格的に参入したのは高度成長が始まる1963年に遡るが、今日までの製造技術の変遷をFig.10に取りまとめた。この間、信頼性ある溶接構造への設計改良、帯状電極を使用した内面ステンレス鋼肉盛り溶接技術の開発を行い、圧力容器の大型化へ対応するとともに、水素脆性、水素侵食、ステンレス鋼肉盛り溶接部の水素誘起割れなどの高温水素損傷問題に取り組んできた。これらの活動は鉄鋼協会が管轄する日本圧力容器会議（JPVRC）の水素脆化専門部会での共同研究テーマとして推進し、世界の石油精製工業の進展に大きな寄与をなしたものと考えている。また、鋼材に含まれるP、Snなどの不純元素の粒界偏析に起因した焼戻脆化問題は高压容器の破壊安全性を損なう当時の重要な克服課題であり、脆化促進パラメーターとして提案したJーファクターの制限が1970年中期には製造仕様書に基準化

	1'st Generation	2'nd Generation	3'rd Generation	4'th Generation
Year	1965~1972	1973~1980	1981~1987	1988~
Technology Improvement	Heavy Thk. Forged Ring	Forged-in Shell / One Piece Head Improved RTJ / Internal Attachment	3Cr-1Mo-1/4V-Ti-B steel	SERVICEABILITY ASSESSMENT
Thickness & Size-up	325t (211mm) 500t (260mm) 841t (251mm) Field Fab.	F22 steel reactor 930t (250mm) 850t (260mm)	max. 282mm 1500t (282mm)	max. 1500t (1450t, 273mm) F3V steel reactor
J-Factor	No-Spec. $J=(Si+Mn)X(P+Sn)10^4$	$J=300\text{max.}$ $J=250\text{max.}$ $J=180\text{max.}$	$Si=0.10\text{max. (VCD Process)}$ $J=150\text{max.}$ $J=130\text{max.}$	$J=100\text{max.}$
CVN impact Prop. Av.55/Min.45J	$\leq 10^\circ\text{C}$	$\leq 0^\circ\text{C}$ $\leq 7^\circ\text{C}$	$\leq -15^\circ\text{C}$ $\leq -20^\circ\text{C}$	$\leq 20^\circ\text{C}$ (RT) $\leq -40^\circ\text{C}$
Weld Overlay	SAW process	PZ process	Improved single layer Improved double layer	

Fig.10 Development of petrochemical reactor pressure vessels

CVN : Charpy V-notch
SAW : Submerged Arc Welding
PZ : Penetration Zero

されるようになった。これらのJファクターの低減はVCDプロセスの採用により可能となり、現在では焼戻脆化問題は工業的に解決をみたものと判断されている。

高度成長時期にはプラントの高効率化から運転条件の高温高圧化と大型化がさらに進み、1980年初期には容器重量を軽減し併せて高圧水素環境に強い压力容器用鋼材の開発が要求されるようになった。これらの要求の背景には新エネルギー開発の一環として登場した石炭液化プロセスの開発があり、プラントサイトまでの大重量压力容器の輸送制約がネックとなったためである。国内ではNEDO（当時、新エネルギー総合開発機構）がこの材料開発を日本製鋼所に委託し、1980年から5ヶ年の压力容器材料開発に従事した。この材料開発プロジェクトでは、3Cr-1Mo-1/4V-Ti-Bの合金組成を有する大型压力容器用鋼が開発され^{10)・12)}、国内の石炭液化パイロットプラントに供用されるとともに、ASMEの材料・設計規格材として認定を取得した後、国内外の石油精製プラント向けに1,000トン重量級の大形リアクターが計38基製造されている。Fig.11に示した最大規模重量の大形リアクターは、このNEDO開発研究により誕生した压力容器用鋼が適用されたものである。一方、米国でもほぼ時を同じくして、MPC（Materials Properties Council）が主体となり、米国石油協会（API）、国際石油資本、日本の鉄鋼会社などがスポンサーとなり、高強度压力容器用鋼の開発が行われ、国内プロジェクトと併行して材料開発に参画した。このプロジェクトでは、482C（900F）までのDiv. IIベースの設計が可能な2 1/4 Cr-1 Mo-V鋼が開発され^{13)・14)}、同様にASMEでの規格化後に大型压力容器への適用が始まっている。これらの材料開発は、長期間高温運転時の信頼性の確認が重要となるため、長時間クリープ破断試験データの集積など実用化には長い研究期間を必要としたが、1960年中期から試行錯誤的に進めてきた長期に渡る高温水素損傷などの研究体験の集



Fig.11 An 1450 ton weight hydroprocessing reactor

約が実用化を可能としたものと考えている。

5 結言

我が国では戦後の高度経済成長期から、タービンロータシャフトを始めとする鍛鋼部材の大型化が進むとともに、過酷化する運転条件に対しても十分な信頼性を有する鍛鋼機器が製造されるようになった。これは、鍛造に関わる技術者・研究者のたゆまぬ製造技術開発・材料開発により実現されたものである。近年は、成長期を脱して、資源保護や地球環境問題への対応から、鍛鋼部材への要求もより一層厳しく、また、新しい視点での開発が求められるようになってきている。これまでの技術開発を基盤として、今後も、産業界の要請に応える新材料、新技術が生み出されていくものと期待する。

参考文献

- 1) E.Danner and G.Taylor : Paper presented at Vacuum Metallurgy Conference, New York University, New York (1960)
- 2) T. Azuma, Y. Tanaka, Y. Ikeda and H. Yoshida : Clean Steel Technology, ASM, Materials Park, Ohio, (1992), 213.
- 3) 館野万吉, 鹿野昭一: 塑性と加工, 17 (1966), 299.
- 4) 館野万吉: 鉄と鋼, 70 (1984), 1631.
- 5) 東司, 田中泰彦, 山田人久, 石黒徹ほか: 日本製鋼所技報, 53 (1997), 1.
- 6) Y. Tanaka, T. Azuma and N. Yaegashi : Proc. Materials Aging and Component Life Extension, Vol.1 EMAS, West Midlands, UK, (1995), 543.
- 7) 金子了市, 中村重義, 渡辺靖男, 田中泰彦, 藤田利夫: 火力原子力発電, 46 (1995), 968.
- 8) 大西敬三, 塚田尚史, 鈴木公明, 三浦立, 楠橋幹雄, 佐藤育男: 火力原子力発電, 36 (1985), 849.
- 9) 鈴木公明, 佐藤育男, 村井悦男: 日本製鋼所技報, 45 (1991), 58.
- 10) 石黒 徹, 大西敬三, 渡辺十郎: 日本製鋼所技報, 42 (1986), 105.
- 11) 石黒 徹, 大西敬三: 鉄と鋼, 71 (1985), 986.
- 12) 石黒 徹, 大西敬三: 鉄と鋼, 72 (1986), 70.
- 13) T. Ishiguro, Y. Murakami, K. Ohnishi and J. Watanabe : ASTM Special Technical Publication 755, ASTM, (1982), 129.
- 14) T. Ishiguro, K. Ohnishi, Y. Murakami, S. Mima and J. Watanabe : MPC-21, ASME, ed. by R.A.Swift, (1984), 43.

(2003年4月21日受付)