

発電用大型タービン軸材製造技術の技術史的検討

— 日本製鋼所室蘭製作所における展開 —

大 島 聡 範*

Review on the History of Development in Production Technology of Large Steel Forgings for Steam Turbin Roter Shaft for Electric Power Plant
— Case Study on the Muroran Factory of Japan Steel Works Ltd. —

Toshinori OSHIMA

Abstract

Large steel forgings have been playing important role of fundamental components in various fields of present heavy industry. The forging used for steam turbin roter shaft for big power plant is in particular required to combine very large dimensions with high quality because of its severe operating conditions. Coexistence of these two factors has been, however, one of the most difficult problem in steel technology.

Accordingly, the successful achievement in the production technology of ultra large high quality steel forging should be regarded as one of the most valuable accomplishment in recent steel technology.

This paper describes, from a viewpoint of history of technology, the process of development in manufacturing technology of high quality ultra large steel forgings in Muroran factory of the Japan Steel Works, which is known as a leading company in this field, having excellent technology, high ability in the engineering and equipped with substantial facilities.

1. 緒 言

大型機械・構造物の部材として用いられる大型鍛鋼品は、産業の基盤を支える構成要素として大きな役割を果たしている。とくに発電用超大型タービン軸材は、大型鍛鋼品の中でも、最も巨大でかつ高い品質を要求されるものであり、その製造には、製鋼から造塊、鍛造、熱処理の各工程において、極めて高度の技術水準が要求される。したがって、発電用超大型タービン軸材は、近代鉄鋼技術における一つの到達点を示す指標とも言えるものである。しかしながら最近では、このような軸材大型化の傾向は一段落した感がある。それは、エネルギー資源および地球環境に関わる諸問題が深刻化するに及んで、エネルギー資源の多様化ならびに環境負荷の軽減が重視されるようになり、これに対して、発電プラントの形態も、大規模一極集中型に対する、中、小規模地域分散型の有効性が認識されてきたことによるものである。

このような意味から、現時点において、発電用タービン軸材の大型化、高品質化における技術開発の過程がどのようなものであったかについて、調査し考察することは、技術史研究における重要な課題の一つであると言える。

この製品分野においては、世界のトップクラスには日本企業が顔を並べているが、なかでも日本製鋼所室蘭製作所の技術は、その頂点をきわめたものとして評価が高い。同所は、大型鍛鋼品の製造では90年の歴史を持つ、日本を代表する工場である。その設立の経緯により、海軍の艦艇および火砲関連製品の受注が多く、軍需の厳しい品質基準に対応した技術は、民需品の製造においても高く評価された。この技術は戦後に受け継がれてさらに発展し、各種の大型鍛鋼品の製造において国際的な評価を確立した。とくに、発電用超大型タービン軸材の製造技術では、世界最高の水準に達している。^{(1)~(4)}

最近の火力・原子力発電所は、スケールメリットによる経済性の追求にともなって単機容量は増大し、タービンも著しく大型化している。現在の

* 教授 機械工学科

1000MW級の原子力発電プラントにおいて使用される低圧タービンロータは、大型鋼塊から鍛造、熱処理の工程を経て製作されるが、鍛造打ち上げ状態で、直径2.9m、長さ10数m、重量350tにもおよぶ巨大なものである。タービンロータの作動環境は、高温、高圧の蒸気噴流中で高速回転に伴う遠心力および起動、停止に伴う熱応力を受ける過酷なものであり、さらに10数年以上の耐用年数を要求される。したがって、大型鍛鋼品のなかでも最高級の品質を要求されるものである。この素材としての鋼塊重量は、最大で600tに達するが、このような超大型鋼塊を健全な状態で製造し、さらに鍛造、熱処理、機械加工の諸工程を経て、高品質の軸材を完成させるためには、高度の技術とそれに対応した大規模な設備が要求される。しかし、このような技術と設備を兼ねそなえた企業・工場は世界的にも数少ない。とくに、600t鋼塊から鍛造、熱処理、機械加工を経て高品質の超大型ロータを製造することができるのは、日本製鋼所ただ一社のみであり、この分野においては、世界に並ぶものは無い。

本稿は、発電用大型タービン軸材で世界を制覇した、日本製鋼所室蘭製作所の技術とはどのようなものか、どのようにして形成されたか、またそれを成立させた要因はどのようなものであったかについて、技術史的観点から調査し、考察を行ったものである。

2. 日本製鋼所室蘭製作所の成立と技術展開

日本製鋼所室蘭製作所は明治40年（1907）に北海道炭鉄汽船（株）とイギリスの鉄鋼、機械、兵器メーカーであるアームストロング社およびビッカース社の3社共同出資によって設立された。当時の政府、とくに海軍からの強い要請によって、軍艦の装甲板、砲塔、砲身などを製造することを主目的としたため、当初は軍需の比率が高かったが、その後は民間受注も増加し、船舶、産業機械、鉱山機械品および化学工業用高圧反応筒などを製造した。同所には、創立当初から、50t平炉二基、5000tおよび4000t水圧プレス各一基が設置されたが、これは当時の国内最大、最高の能力を有するものであった。ここにおいて既に、大型鋼塊から、高品質の大型鍛造品を製造することを技術の根幹に据えた、同社の基本方針が明確に表れている。操業開始して2年後には、早くも100t鋼塊の製造に成功しているが、これは当時の技術水

準からすれば、驚くべきものであった。このような経過を経て、設立後10年の大正6年（1900年）には、国内の鍛鋼品の60%を製造するに至っている。設立の経緯からして、砲身、砲塔、艦艇構造部材など、海軍を主体とする軍需品の受注が多かったことから、厳しい品質基準をクリアするために、基礎研究から現場技術にいたるまで、常に品質の向上を目指して改善が行われ、その技術水準は民需品の製造においても高く評価された。⁽¹⁾⁽²⁾

大正から昭和10年代にかけては、政府の軍備増強の方針にともなう軍需の受注増大に対応して、さらに各種の大型設備が導入された。なかでも昭和15年に設置された10000t水圧鍛造プレスは、当時国内最大で世界的にも数少ないものであった。このプレスは砲身、発電機用品、高圧反応筒等の大型鍛造品の製作に威力を発揮して、戦中戦後を通じて同社独自の製品領域の確立に大いに寄与した。主題の発電用大型タービン軸材の製造において、同社が世界的水準に達し得た主要因のひとつは、この10000tプレスの作業能力と、それを駆使した鍛造技術にあったといえる。また、熱処理においても、砲身等の長大な鍛鋼品の熱処理において、加熱、急冷過程に発生する熱変形を、最小限に留める技術とそのための設備は、タービン軸材等の長物の製造において、重要な役割を果たしている。⁽³⁾

創業当初の明治40年から43年にかけて、多数の超大型工作機械が設置された。これらのほとんどは英国から輸入されたもので、世界的にみても最大級のものであった。これにより、製鋼から造塊、鍛造、熱処理、機械加工にいたるすべての工程が、大型鍛鋼品の製造という事業目的に対応したものとなった。なおこれらの多くは、現在も使用されており、前述の10000tプレスと並んで、同社の大きな特色となっている。⁽⁴⁾

第二次大戦の終結とともに、受注の大部分を占めていた軍需は消滅し、民需品の製造に方向転換したが、大型製品の受注は少なく、同社にとって苦難の経営が続いた。ここで1950年に勃発した朝鮮動乱は、いわゆる特需品の膨大な発注をもたらした。これに伴って日本の製造業は、にわかに活況を取り戻したのである。同社はこの時期から経営状況もやや安定し、本来の技術を生かした大型鍛鋼品の製造に再び力を注ぐことになった。この場合、室蘭製作所の戦災被害が比較的軽微であり、戦前においてすでに世界的水準に達していた大型鍛鋼品製造のための設備が、ほとんどその

まま戦後に受け継がれたことは、他社と比べて有利な条件であった。

この朝鮮動乱による受注の増大は一過性のものではあったが、これを契機として日本の製造業は急速に復興に向った。それに伴って電力需要は急激に増加し、それに対処して、各地で火力発電所の建設が進められ、発電用タービンロータの需要も大幅に増加した。⁽⁴⁾

1950年代において、大型鍛鋼品を製造しうる国内企業は、日本製鋼所、神戸製鋼所、八幡製鉄（後の日本製鉄）の3社であった。しかし、発電用タービンロータに対する品質基準は、大型鍛鋼品のなかで最も厳しいものであり、これをクリアする素材としての高品質大型鋼塊を製造することは、至難のわざであった。したがって、国内の火力発電用タービンの、容量75MW以上のもの

さを示すものであり、長期にわたる実績の積み重ねのなかで、大型鍛鋼品の製造技術を発展させてきた結果として評価される。

3. 発電プラント容量の増大と鋼塊の大型化

昭和25年に勃発した朝鮮動乱は、前述のとおり、日本の産業界にとって戦後の復興の足がかりとなり、その後の高度経済成長の出発点となるものであった。これを契機として、製造業を中心とする設備投資が活発に行われ、相次ぐ生産設備の増設と操業開始にともなって、電力消費は急上昇した。当時は水力発電が主体であったが、水力発電所の新設は、ダム用地の選定、買収にはじまる、長期の建設期間が必要であり、さらには、一般には長大な高圧送電線を建設しなければならない。したがってこのような電力需用の急増に対処

表1 世界の大型鍛鋼品メーカーの製造能力⁽⁶⁾

国名	メーカー名	製造能力		
		最大鋼塊 (t)	プレス能力 (t)	1200MWe 原発機器部材製造能力
日	JSW	570	10 000	○
	A	500	8 000	○
	B	400	8 000	○
	C	280	(10 000) 6 000	△
製鉄先進国	US Steel	370	9 000	
	Bethlehem Steel	350	10 000	
	Ladish Steel	(購入)	—	
	Sheffield Forge Masters	230	10 000	
	Klöckner Werke/Osnabrück	250	9 000	
	Thyssen/Hattingen	410	8 000	
	Creusot-Loire/Creusot	200	11 300	△
	Terni	280	12 000	
	Vitkovice	(購入)	12 000	
	Skoda/Pízen	200	10 000	
製鉄中進国	Izhorsky Zavod	235(300)	12 000	
	中国 上海重型機器廠	300(ESR)	12 000	
	第1 重機機器廠	200	12 500	
	第2 重機機器廠	210(300)	12 000	
	ルーマニア IMGB	120(400)	12 000	
韓	韓国重工	430	10 000	

は、ほとんどが、General Electric社やWesting House社などによる外国製で占められていたのである。日本製鋼所室蘭製作所が、発電用タービンロータ大型化の研究開発に着手したのは、このような時期であった。⁽³⁾⁽⁵⁾

以後40年を経て、現在では世界最大の600t超大型鋼塊から、発電容量1350MW級のタービン軸材を製造するまでに至った。表1は世界の大型鍛鋼品メーカーの製造能力の比較であるが、超大型ロータの製造はほとんど日本の独壇場であり、日本製鋼所はその首位を占めている。⁽⁶⁾このことは、同社の大型鋼塊の製造技術をはじめとして、鍛造技術、熱処理技術を含めた総合的な技術水準の高

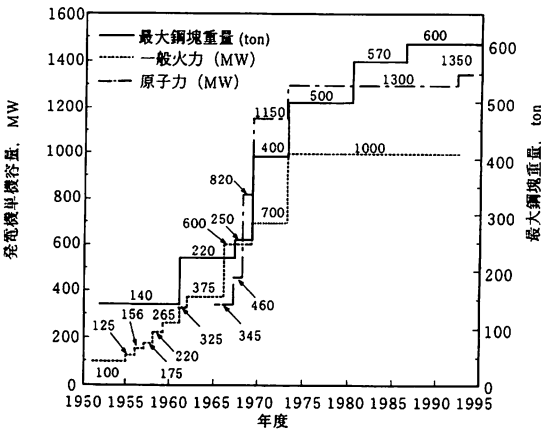


図1 タービン発電機の単機最大容量と最大鋼塊重量の推移⁽⁹⁾

するには不向きであった。そこで、比較的短期間で大容量プラントの建設可能である、火力発電所の新設が次々に計画され、実施に移された。

図1は国内の発電用火力、原子力タービン発電機の単機最大容量と最大鋼塊重量の推移を示す。⁽⁷⁾単機容量の戦前における最大は戸畑53MW、1938年であるが、その後は戦中戦後の長い停滞期に入り、53年の汐田3号、名港4号の55MWで漸くこれを越えるまでに15年を要している。以後は56年に荏田1号の75MW、57年に千葉1号の125MWと増大し、64年の横須賀3号の350MWから67年の姉崎1号で600MW、さらに74年の鹿島5号において、ついに1000MWに達した。このように、1950年代後半から70年代にかけて火力発電プラントの大型化は急速に進行したのである。一方、原子力発電所の建設は1970年に開始された。BWR系では、1970年の敦賀1号における357MWに始まり、74年の福島1号の460MW、同2号の784MWを経て、78年の東海2号において1100MWに達した。最大は柏崎6、7号の1356MWである。また、PWR系は70年の美浜1号の340MWにはじまり、72年の美浜2号500MWから74年の高浜1号826MWを経て、79年には大飯1、2号の1175MWに達した。最大は大飯3、4号、玄海3、4号の1180MWである。このように、70年に始まった原子力発電所の建設は80年代にかけて加速的に進行している。

発電プラントの単機発電容量増大に伴って、発電用タービンロータ素材としての最大鋼塊重量も、ほぼ同じ傾向をたどって増大した。戦前から1950年代までは140tで推移したが、1961年に220tへと増加した。67年の250tから69年には400tへと大幅に増加したが、これは原子力発電プラントの容量増大の時期と一致する。その後、72年の500tから80年の570tを経て、86年にはついに600tに達した。これは、鋼塊重量としては世界最大である。

このような大型化の過程において、製造技術の進展に寄与した要因の一つは、製造者と発注者の間において、技術的な情報交換および共同討議が行われ、また共同研究が展開されたことである。この過程においては、まず電力会社による発電プラント大型化計画に沿って、タービンロータ大型化の要請があり、それに対応して、製造工程改善への取り組みが進められる。ここで、電力会社、タービン製造会社、軸材製造会社の三者共同討議が行われ、さらには共同研究も行われる。後述す

るように、ロータの大型化における基本的な課題は、鋼塊の大型化と高品質化という、相反する条件を如何にして両立させ得るかにある。ここにおいて、需要者側の要求する品質基準と、製造者側の実現可能な品質水準の突き合わせが行われ、提示された具体的な数値目標を実現するために、必要に応じて、両者の共同研究による実験的検討が行われるのである。

1975年に当時西ドイツのKWU社（Kraft Werk Union）から受注した低圧ロータは、ディスク一体型であり、その素材として必要な400t鋼塊の品質は、これまでの実績を越える高い水準を要求されるものであった。そこで、両社の技術スタッフによる共同討議が提案され、種々の技術的問題点について意見交換と討論が行われた。その成果にもとづいて技術開発を進め、76年に胴径2.9mの一体型超大型ロータを完成した。このことは、国際的な評価を獲得する第一歩となるとともに、国内の需要家の信頼を高めるものとなった。1978年に、国内のタービンメーカーである東芝および日立から原子力発電用の一体型超大型低圧タービンロータを受注したが、それに際して両社から共同研究が提案された。これまでの実績を越える超大型低圧ロータであることから、実機へ採用決定に先立ち、テストロータ軸材を製造して、その性能を確認しようというものであった。この共同研究は1年間にわたって行われ、ロータ製造技術における多くの貴重なデータが得られた。その成果により、79年に電源開発の竹原において国内初めての一体型低圧ロータの採用が決定し、つづいて80年には東京電力の広野に採用された。さらに1980年には、三菱重工と共同研究を行い、その成果によって関西電力の高浜への採用が決定した。これらの実績によって、一体型超大型ロータの実用化は急速に進行し、さらに83年には、アメリカのGeneral Electric社およびWesting House社から、一体型超大型低圧ロータを受注するに及んで、国際的な評価が確立されたのである。

このような過程を通して、需要家から提示された品質基準に対応し、さまざまな課題を解決するために研究開発と技術改善が進められ、ロータの大型化と高品質化において多くの成果が得られた。その中でとくに重要なものを挙げれば次の3項目である。

- (1) 一体型ロータの大型化
- (2) 原子力発電用低圧タービンロータの大型化と品質向上

(3) 低圧タービン用スーパークリーンロータの開発

次章において、蒸気タービンに関する基本事項を解説し、その後の各章において、提示された技術的課題の内容と、それを解決するために行われた要素技術の研究開発、ならびにその成果について述べる。

4. 蒸気タービンの構造とロータ軸材の製造工程

図2は高低圧一体型蒸気タービンを示す。基本原理は、高温高压の蒸気を、固定翼を通過させる

要とするものである。とくに低圧タービンは、中、高压タービンに比べて蒸気の圧力が低く体積流量が増大するため、タービン翼長は大きくなることから、ロータの直径も著しく増大し、全体の構造は巨大なものとなる。

タービン軸材の製造工程を図3に示す⁽⁸⁾。主要工程は、溶解、造塊、鍛造、熱処理、機械加工であるが、それぞれの工程に付随して各種の検査が行われ、また工程間においても、必要に応じて焼鈍、機械加工が行われる。各工程はそれぞれに重要であるが、なかでも最も重要なのは、溶解から造塊の過程である。製品の品質はこの工程の成否によって決定的に支配され、後の工程で改善する

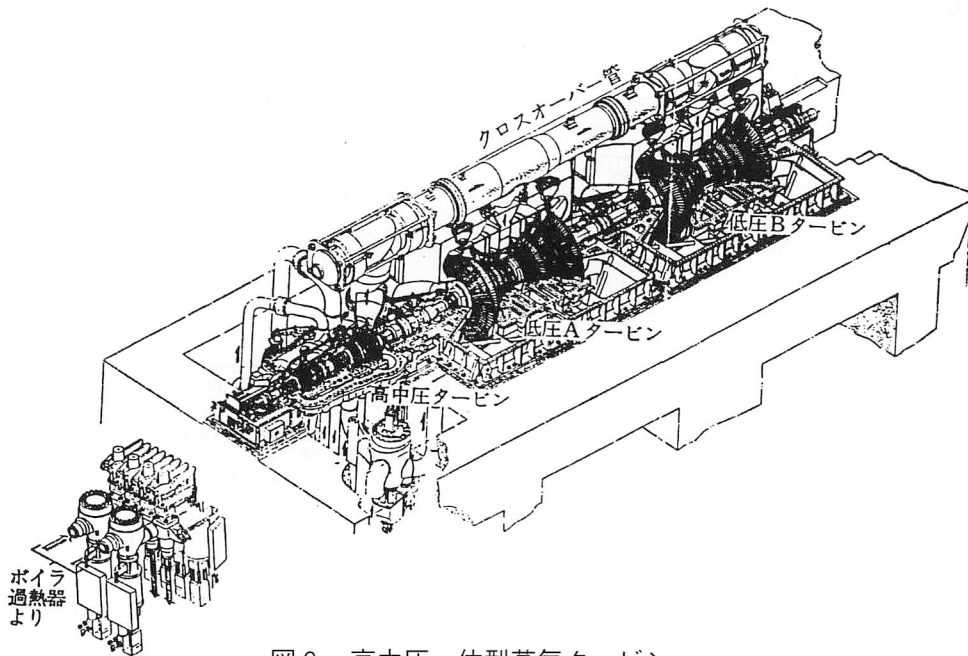


図2 高中圧一体型蒸気タービン

ことによって、動翼に噴射し回転させるものである。動翼はディスクを介してロータに取り付けられているので、蒸気噴流のエネルギーによってロータは回転する。発電用大型タービンは一般に高圧、中圧、低圧の3段階に分かれている。ボイラから供給される高温高压の蒸気は、最初に高圧タービンに入ってこれを駆動し、再熱されて温度、圧力を回復したのち、中圧タービンを駆動する。ここで温度、圧力の降下した蒸気は、さらに低圧タービンを駆動したのちコンデンサーに回収される。高圧タービンに供給される蒸気の温度および圧力は、最近の超々臨界圧プラントにおいては、539℃、339MPaに達している。

ロータはタービンシステムの構造部材の中心となるもので、その寸法、重量の大きさと品質に対する要求の厳しさから、最も高度の製造技術を必

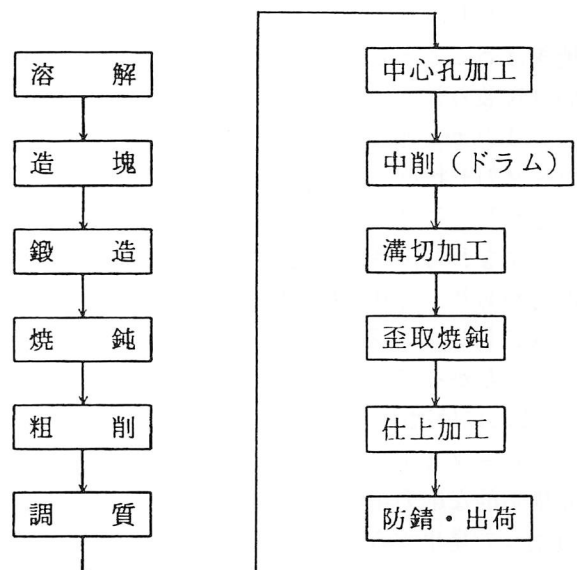


図3 タービン軸材の製造工程⁽⁸⁾

ことは、ほとんど不可能である。後述するように、ロータの大型化と高品質化は製鋼、造塊工程の改善によってはじめて可能となるのである。

5. ロータの大型化と高品質化

5. 1 一体型ロータの大型化

タービンロータは、材料強度的には、軸部とディスク部が同一の材料から切削成形される一体型が望ましい。しかし一体型の場合、軸素材からディスク部を削り出すので、素材の胴径は必然的にディスク直径よりも大きくなければならない。したがって、一体型ロータを大型化するためには、素材鋼塊の寸法は非常に大きなものとなる。

ング摩耗の発生する恐れがある。(3) 胴径に対して長さの比が大きいことから、許容応力を大きくするために材料強度の設定が高くなり、応力腐食割れの発生を助長する要因となる。(4) たわみ軸構造となり、その固有振動数が低いので、起動、停止にともなって通過する低回転速度域において、不安定振動が発生しやすい。

これらは致命的な破壊事故につながる潜在的要因であるが、一体型ディスクを採用することによってほとんど排除することが出来る。すなわち、はめあい部と応力集中部が無くなるので、フレットングおよび応力腐食割れ発生の恐れは解消する。さらに、長さに対する胴径の比が大きくなって剛性軸となり、不安定振動の発生が無くな

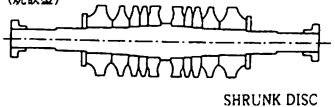
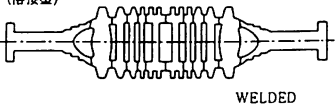
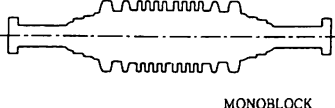
ロータ様式 (断面図)	特 長
組立型-1 (焼嵌型)  SHRUNK DISC	1. 構造的に応力集中部(キー溝)が存在する。この部分に応力腐食割れ(SCC)が発生し、破壊に至った例がある。 2. 設計上材料強度を高める必要があり、SCCの助長因子ともなる。 3. たわみ軸構造となるため振動が発生し易い。
組立型-2 (溶接型)  WELDED	1. 特殊な溶接が必要であり、メーカーの制約がある。(BBC, アルストーム)
一体型  MONOBLOCK	1. 構造的に応力集中部が少ないので、SCCの発生がし難い。 2. 材料の強度も組立型に比べ低く出来るので、SCCの感受性が低くなる。 3. 剛性軸となるので振動発生が少なくなり、かつ運転・保守が楽になる。

図4 超大型低圧タービン軸材の構造様式⁽⁹⁾

しかし、鋼塊が大きくなると内部欠陥は増大するので、健全な大型鋼塊を製造することは容易ではない。そのため、1970年代の大型タービンロータのほとんどは一体型ではなく、小胴径のロータに焼きばめによってディスクを固定する方式、あるいは複数のディスクを溶接によって接合する方式のいずれかで製造されていた。図4はこれらのロータの形状を示す。⁽⁹⁾

しかし、これらの方式は次のような問題点がある。すなわち後者は、溶接部の信頼性には種々の問題があり、特殊な技術が必要とすることから、それに対応しうるメーカーは少数に限られている。したがって、一般には前者が採用されていたが、これには次のようないくつかの問題点がある。

(1) ロータとディスクの締結に使用するキーミゾが構造的な応力集中部となり、この部分に応力腐食割れの発生する恐れがある。(2) ロータとディスクのはめあい部における微小すべりの繰り返しによってフレットング疲労あるいはフレッティ

る。したがって、発電用タービンの安全性を保証しつつ大型化し、さらなる出力増大を計るためには、ロータを一体型化することが必要である。しかし前述のように、素材鋼塊の質量が大きくなれば、鋼塊中の内部欠陥が増加することは避けられない。すなわち、一体型ロータ大型化の要求に応えるためには、素材としての鋼塊を大型化しつつ、出来る限り欠陥の少ない健全な状態で製造するという、相反する条件を両立させる技術の開発が必須の条件であった。

5. 2 原子力発電におけるロータの大型化と高品質化

原子力発電は、核分裂による熱エネルギーを利用したボイラ・タービン発電システムであり、基本的には火力とほぼ同じであるが、火力と比較して蒸気の圧力および温度が低く設定されている。発電効率の点からすれば高温、高圧が望ましいのは当然であるが、発電容量が非常に大きいので、ボ

イラ・タービンプラントも大型となり、また原子力プラント特有の安全性問題も加わって、蒸気の圧力および温度を高く設定しつつ、十分な安全性を保証したプラントを建設し運転することは、経済性の面から問題が生じるのである。BWR型プラントにおける標準では、タービン入口の蒸気圧力、温度は、67MPa、283℃であるが、これは超臨界火力タービンの標準的な値である、264MPa、538℃と比較して非常に低い。このような低温、低圧の蒸気条件のもとでは、熱落差が少ないため蒸気消費量が多くなり、また圧力が低いため体積流量も増加するのでタービン各部の直径と翼長を大きくせねばならず、火力と比較して大型構造となる。さらに、翼の長大化によってロータにはたらく遠心力は増大するので、高い引張り強度と優れた靱性が必要となり、とくに材料欠陥は厳しく規制される。すなわち、原子力発電用のタービンロータの製造においては、大型化と高品質化という相反する要求を満足させなければならない。

5. 3 低圧タービンロータ材における品質向上

一般的な発電用タービンにおいて、ボイラで発生した高温高压の蒸気は、高压タービンおよび中圧タービンに導入されてロータを駆動し、そこで温度、圧力の低下した蒸気は、さらに低圧タービンに導入されて低圧ロータを駆動する。したがって低圧タービンの蒸気温度は、高压タービンの入口蒸気温度によって決まる。熱効率の向上のためには、高压タービン入口蒸気温度を高くして、低圧タービンの作動温度を上昇させることが望ましいが、そのためには、次のような材料問題を解決しなければならない。

低圧ロータの材料としては、従来から強度および低温靱性に優れた3.5%Ni-Cr-Mo-V鋼が最適材料として使用されてきた。しかしこの鋼種は焼戻し脆化の感受性が高く、350～575℃の温度域に長時間加熱すると脆化して靱性の低下を生じる性質がある。したがって、熱効率向上のために蒸気温度を上昇させれば、作動温度が脆性温度域に入り、使用中に材料の脆化が進行する恐れがある。低圧ロータは原子力発電の項で述べたように、応力条件が厳しいため、とくに優れた靱性が要求される。したがって、使用中の脆化を避けるために、使用上限温度を350℃とした設計がなされており、このような使用温度の制限は、プラントの熱効率向上の障壁となっていた。一方、最近の発

電効率の向上を目的として超々臨界圧発電では、低圧タービンの入口蒸気温度も450℃程度となり、この温度域において使用中に脆化を生じないような、焼戻し脆化感受性の低い低圧タービンロータ材料およびその製造技術の開発が必要となる。

6. 大型タービンロータの製造における要素技術の開発と成果

タービン軸材の大型化において、まず解決しなければならない第一の問題は、欠陥の少ない、健全な大型鋼塊を如何にして製造するかということである。また第二の問題は、鍛錬工程において組織を緻密化し、欠陥を圧着するために、如何にして大型鋼塊の内部まで鍛錬効果を与えるかということである。さらに第三には、巨大な質量を有する鍛鋼品に如何にして効果的な熱処理を行い、優れた機械的性質を与えるかということであり、第四には、製品の軸材において、高速回転体としての安全性評価の信頼性を、如何にして高めることが出来るかである。

6. 1 製鋼、溶解および造塊

前章において、大型タービンロータ製造における、主要な技術的課題について述べたが、それらのすべてに共通するものは、大型鋼塊を、欠陥の少ない健全な状態で製造するということであった。製品の品質を規定する最も基本的な要因は素材としての鋼塊の品質である。大型鋼塊中に発生する欠陥の主要なものは、偏析およびザクである。図5は75t鋼塊中に現れた欠陥の状態を示す。偏析は鋼中の成分の不均一分布であり、有害不純物の局部的濃縮がとくに問題となる。¹¹⁾またザクは、凝固過程における溶湯の体積収縮にともなって形成される空隙状の欠陥である。後者は、鍛造工程において圧着閉鎖し消滅させることが可能であるが、前者を改善し無害化することは極めて困難である。これらの欠陥は鋼塊の大型化すなわち凝固時間の増加につれて増加することから、鋼塊大型化の成否は、これを如何にして軽減しうるかにかかっている。そしてこれらの欠陥は、溶鋼の凝固過程すなわち造塊工程において、ほとんど不可避免的に発生するものであるから、欠陥の発生を低減するためには、製鋼、溶解工程において、鋼中の不純物を出来る限り低限することが最も重要である。

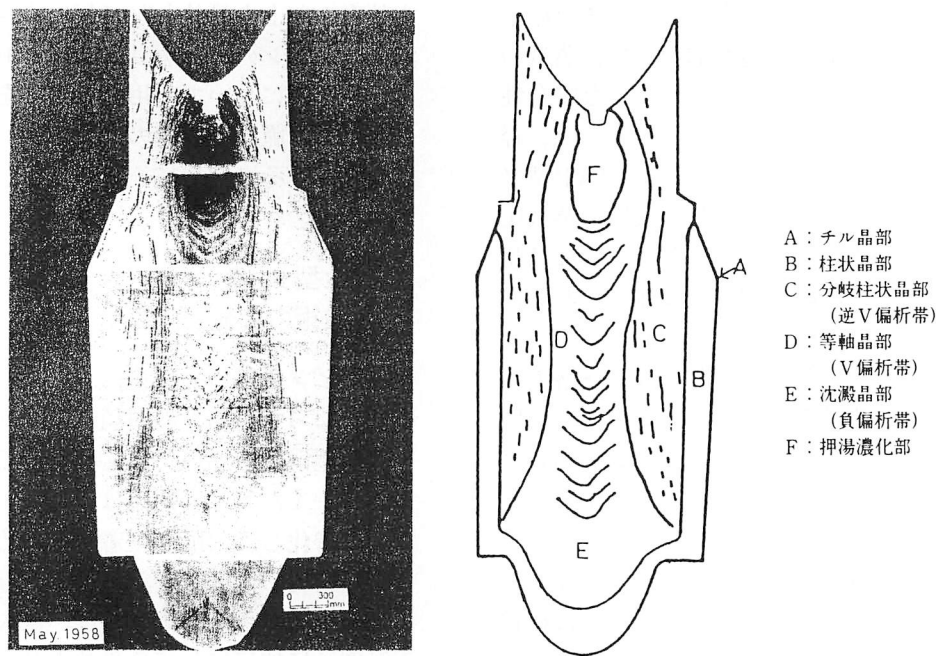


図5 75t鋼塊中の偏析と欠陥¹¹⁾

表2は室蘭製作所における、製鋼、溶解および造塊技術の進展を示したものであるが、これは、溶鋼中の不純物の低減の歴史と言っても過言ではない。戦前から1950年代において、大型鍛鋼品の素材としての鋼塊は、不純物の少ない原料を用いて先ず塩基性平炉で溶解し、有害成分である燐と硫黄を除去（脱燐、脱硫）したのち、さらに酸性平炉で再精錬していた。この再精錬は専ら鋼中の水素を低減する目的で行われたものであった。燐、硫黄は周知のように鋼中に固溶してその靱性

を低下させる有害元素であり、また溶鋼中に固溶した水素は、鋼塊の凝固、冷却にともなう固溶度の減少によって鋼中の微細空隙に析出し、割れを発生させる。白点やゴーストクラックなどと呼ばれるこの現象は、大型鍛鋼品に特有のものであり、時には致命的な欠陥として製品廃却の原因となる。これを排除するためには、溶鋼を酸性平炉によって再精錬し、さらに鋼塊を長時間加熱保持して固溶水素を放出する脱水素焼鈍を行うなど、多大の時間と費用を要していたのである。

表2 日本製鋼所室蘭製作所における製鋼技術と設備の変遷¹¹⁾

年	年号	(昭和)								(平成)
	西歴	25	30	35	40	45	50	55	60	2
		'50	'55	'60	'65	'70	'75	'80	'85	'90
溶 解 法	酸性平炉、塩基性平炉									
	(一次精錬)			塩基性平炉、電気炉			電 気 炉			
	(2次精錬)						保 持 炉	取 鍋 精 錬 炉		
								150 ^T 、130 ^T	30 ^T ×2	150 ^T ×2
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			
最大鋼塊	140 ^T		220 ^T	250 ^T	400 ^T	500 ^T	570 ^T	600 ^T		
	(鑄型設計)						低H/D化、高テーパー化			
							350 ^T 作製	450 ^T 作製		

ここで、この問題解決に画期的な役割を果たしたのは、1950年に西ドイツのBochumer Verein社が開発した、真空流滴脱ガス鑄造装置であった。⁽¹⁾装置の概略を図6に示す。基本的には、真空(減圧)容器中に設置された鑄型に溶鋼を注入(注湯)するもので、溶鋼は流滴状態となり、減圧

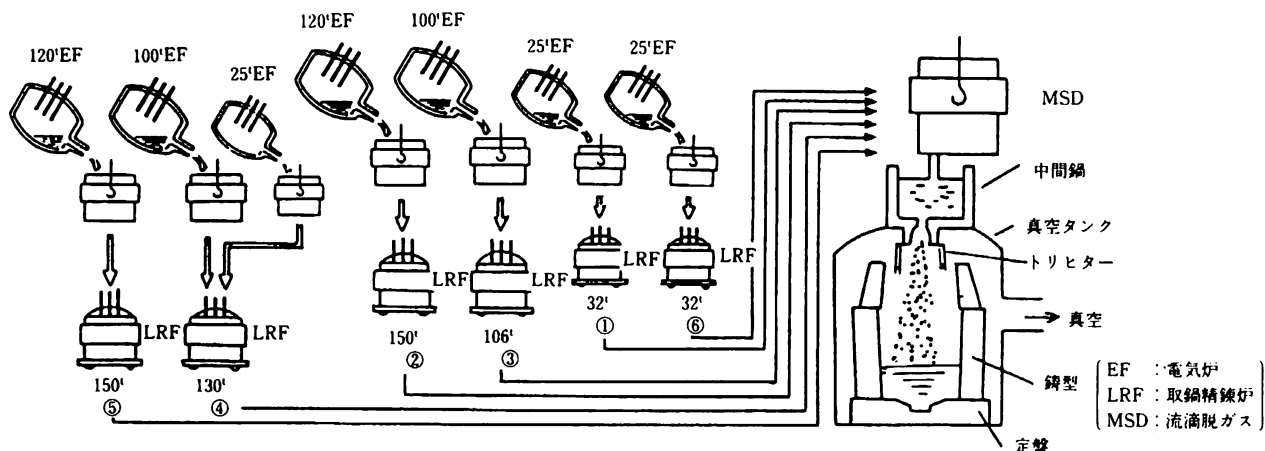


図6 真空流滴脱ガス装置による600t鋼塊の製造プロセス⁽¹²⁾

下で効果的に水素を放出しつつ鑄型に注湯される。室蘭製作所へ導入設置は1960年であったが、これにより脱水素が容易になったため、製鋼、精錬工程は大幅に改善されていった。まず、酸性平炉による脱水素精錬が不要となったため、より効率的な塩基性平炉、電気炉の組み合わせが実施された。

1972年には平炉を廃止して保持炉を設置し、電気炉のみによる精錬へと進化した。電気炉は平炉よりも溶解所要時間は遙かに短く高能率であるが、1チャージの溶解量が少ないことが難点であった。そこで、電気炉で精錬した溶鋼を保持炉に入れて、溶湯のまま加熱保持しておき、複数の電気炉の反復操作による溶湯を合わせることで、大型鋼塊を製造することが可能となった。さらに1977年には、保持炉に真空脱ガス装置を取り付け、取鍋精錬炉として機能を与えた。この取鍋精錬炉は、真空中での強い還元効果と、炉底から吹き込まれるアルゴンガスの強力な攪拌作用によって大きな精錬効果を生じ、不純物の低減に優れた性能を発揮した。この状況は図6に示す。⁽¹¹⁾

鋼塊の品質を左右する主要因の一つは非金属介在物である。鋼中の不純物としての酸素を除去する（脱酸）ためには、一般には酸素と親和力の大きいSi、MnあるいはAlなどの元素を添加して、酸素と結合させ、酸化物として溶湯表面に浮上させ除去する。しかしこれらの酸化物の一部は、非金属介在物として鋼中に残留し、品質低下の原因となる。これに対して著しい改善効果をもたらした

たのは、1972年に工業化に成功したVCD (Vacuum Carbon Deoxidation) 法である。これは、Si等をほとんど含有しない溶鋼を、真空中におけるCO反応を利用して脱酸するものである。これによって、非金属介在物は激減して清浄度は飛躍的に向上し、逆V偏析はほとんど消滅した。⁽¹¹⁾

さらに焼戻脆化促進元素としてのSiが極めて少ないことから、焼戻脆化感受性は著しく低下し、これによって低圧ロータにおける使用温度上限域が拡大した。特に、清浄度の高い、すなわち非金属介在物の少ないスパークリーン鋼の実用化において、大きく寄与した。

6. 2 鍛 造

鍛造工程の目的は、単にその形状をつくりあげるだけでなく、鋼塊の内部に発生するザクとよばれる空隙状欠陥を圧着し、また粗大な鑄造組織を緻密化することである。ザクは前述のように、凝固過程における溶鋼の体積収縮による空隙状欠陥で、その発生傾向は鋼塊の大型化による凝固時間の増大に伴って著しくなる。この種の欠陥の残存は、ロータの致命的な破壊事故の要因となるものであり、とくに発生位置が中心付近であることから、鍛造工程では、大型鋼塊の中心部まで十分な歪みと圧縮応力を与えて、これを確実に圧着閉鎖させ、内部性状を健全化しなければならない。しかし、鋼塊が大型化するともなつて、鍛造に要する荷重は著しく増大するため、現有の国内最大級の10,000tプレスによつても、中心部まで十分に鍛造効果を与えることは容易ではない。時には、数十日にも及ぶ鍛造工程の長期化となり、製造コストの大幅な上昇を招く結果となる。

このような大型鋼塊のザクを、効果的に圧着する方法として開発されたのが温間鍛造法である。⁽¹³⁾

これは、炉内で鍛造温度に加熱された鋼塊を、出炉したのち空中放冷して、表層部のみ冷却した状態で、比較的小さい上金敷によって鍛造する方法である。温度の低い表層部は変形抵抗が高く、高温の内部は変形抵抗が低いので、固いシェルで柔らかい内部を包んだ形となる。この状態でプレスにより圧下すれば、シェルは全体の変形を拘束するため、鋼塊の中心部分の歪みや静水圧が大きくなり、比較的小さな鍛造比で効果的に中心部の空隙欠陥を圧着することができる。この技術は早くも1960年代に開発され、長年にわたって着実に実績を重ねてきたが、経験的な要素の集積による部分が多く、鍛造条件の最適化についての検討は不足していた。しかし、最近のコンピュータの発達と有限要素法プログラムの進歩によって、実際の鍛伸における空隙の圧着問題を、直接三次元的に解析することが可能となり、この方面の研究が進められた。その結果、空隙の圧着には押込み型平金敷鍛伸法が最適であること、および、素材断面を矩形とすることで、軸心部の静水圧応力比が飛躍的に上昇することが明らかにされた。この研究結果は、世界最大の600t鋼塊を用いた超大型低压タービンロータ材の鍛造工程に適用され、直径4mにも及ぶ巨大鋼塊の鍛造過程において、内部空隙を確実に圧着することが可能となった。⁽⁹⁾

6. 3 熱 処 理

熱処理は、加熱、冷却によって鋼の組織を調整し、機械的性質を向上させる工程である。焼入れ過程では、冷却速度はできるだけ大きいことが望まれるが、大型部材では熱容量が大きいことから、単に外部を急冷しても内部の冷却は遅れるので、各部分の冷却速度はことなり、温度分布は不均一となりやすい。これは、組織の不均一性と、熱応力による歪みの発生原因となる。大型タービンロータの熱処理における最大の要素は、基本的には均一加熱、均一冷却であり、その条件を満たしつつ、いかに冷却速度を増加させるかがポイントであった。1950年代半ばまでは空中冷却であったが、部材の大型化にともなって、冷却能力の不足が問題となり、50年代後半にファンによる強制空冷および噴霧水冷却を採用して冷却速度の大幅な増加を計った。しかし、電力プラントにおける発電容量の増加傾向から、ロータのさらなる大型化に対処して、噴水による冷却法を検討し、66年には噴水冷却による急速焼入技術を確立した。

1980年代の後半から高压－低压ロータを一体型

して、タービン構造をコンパクト化する動きが出てきた。この一体型ロータは、低压部については室温強度および靱性、また高压部についてはクリープ破断強度と、それぞれ異なった特性が要求される。そのためには、一体化している両者に異なった熱処理を行い、異なる特性を与えることが必要であった。そこで開発されたのが偏差焼入法である。これは、低压部に対しては900℃の低い加熱温度から速い冷却（水冷）を、高压部に対しては950℃の高い加熱温度から遅い冷却（空冷）をそれぞれ独立に与えるものである。大型ロータ材に、このような不均一な加熱、冷却条件を与え、熱処理変形の発生を避けつつ、所定の部位に要求される材料特性を得ることは容易ではない。ここで、コンピュータを用いた有限要素法の適用によって、各部の冷却条件を独立に制御した場合の材料特性を予測することが試みられた。まず、化学成分の決まっている鋼の材料特性は熱処理条件によって決定されていることから、焼入れ加熱温度、焼入れ冷却速度および焼戻しパラメータの組み合わせによって強度、靱性を求めた。次にコンピュータを用いた有限要素プログラム（ANSYS）を使用して、ロータの各部分の受ける熱履歴を計算し、先に求めてある材料特性データと照合することによって、ロータの有限要素モデルの機械的性質の予測を行った。この手法は最大径1.6m、長さ10数mの低压ロータ材に適用され、要求に応じた熱処理条件の最適化が可能となった。⁽¹⁴⁾

6. 4 安全性評価

発電用タービンロータの破壊事故は、その質量と作動時の運動エネルギーの巨大さから、重大な災害を引き起こすものである。したがって、その素材としての軸材の特性においては最高級の安全性と信頼性が要求される。一般にこの種の大型部材の破壊は、き裂発生、き裂進展、脆性破壊の三段階を経る。ここで、ロータの安全性評価において先ず重視されるのは、き裂の発生特性である。力学的解析によれば、高速回転しているロータにおいては、周方向最大引張り応力は中心孔の内面に作用することが知られている。またこの部分は、素材鋼塊の中心部であることから、不純物の偏析があり、ときには未圧着の空隙状欠陥が残存するなど、き裂発生点となりやすいWeak pointが存在する。すなわち、ロータの安全性評価においては、この部分のき裂発生傾向を定量的に測定

し、材料強度特性として把握することが最も重要である。しかし、既存の試験法は、いづれも定性的な評価に止まっていたため、これについて定量的な評価を行う試験法の開発が望まれていた。

1960年代に至って、線形破壊力学の基本概念が確立され、漸く脆性破壊の発生に関する理論的な解析が行われるようになった。ここにおいて、高速回転体としてのロータ軸材に対して破壊力学の理論を適用し、定量的評価を行うことの可能性が期待されるに至った。

多くの実験と破壊力学検討を重ねた結果、軸材の高速回転によって中心孔内面に発生する周方向応力は、中空材の内圧負荷試験において発生する周方向応力で近似できることが確認された。その原理を応用して開発されたのがJIB試験（Japan steel Internal Pressure Bursting Test）である。¹⁵⁾

これは、トレパン加工で採取されたロータ中心孔コア材から中空円筒試験片を製作し、内圧をかけて破壊特性を評価するものである。この試験は、ロータ中心部のWeak pointを包含した状態の試験片を使用するので、中心部の総体的なき裂発生特性を正しく評価することができる点に大きな特長がある。この方法は日本製鋼所の独自の発想によるものであり、同社の大型ロータ材における安全性評価の信頼性は、JIB試験の適用によって著しく高まったのである。¹⁶⁾

7. 総 括

発電用大型タービン軸材の製造において、世界最高の水準に到達した日本製鋼所室蘭製作所の技術とは、どのようなものであるか、どのようにして形成されたか、また、それを形成した要因はどのようなものであったか、について調査した結果は、つぎのように要約される。

1. タービン軸材の大型化と高品質化は、経済性の追求に伴う単機出力の増大に対応して進行し、原子力発電の実用化によってさらに促進された。その過程を要約すれば次のとおりである。

- (1) 朝鮮動乱を契機とした産業の急速な復興とともに電力需要の急増とそれに対応した火力発電所の大幅な増設。
- (2) 大型化、高温、高圧化による熱効率、経済性の追求による単機出力の増大。
- (3) 原子力発電所の建設による単機出力のさらなる増大。
- (4) 単機出力増大によるタービンロータ大型化

への要求。

- (5) ロータ大型化に伴う組立型ロータの限界と一体型ロータの優位性。
- (7) 一体型ロータの大型化のための、鋼塊の大型化と健全性の両立を目標とした研究開発の推進ならびに新設備の導入。
- (8) 一体型ロータ大型化への取り組みにおける電力会社、タービン製造会社との共同研究。
- (9) 超大型600t鋼塊、1350MW級超大型低圧タービンロータの製造。
- (10) スーパークリーン低圧タービンロータの製造。

2. 大型タービンロータ製造は各工程における要素技術の研究・開発の成果によって実現された。その主要なものはつぎのとおりである。

- (1) 製鋼、溶解：全塩基性電気炉精錬法の採用、保持炉精錬および取鍋精錬技術の開発による有害不純物元素の除去、低減。
- (2) 造塊：真空造塊法の採用、流滴脱ガス技術の開発による、有害不純物偏析、介在物および欠陥の低減。
- (3) 鍛造：JTS特殊鍛錬法－特殊温間鍛錬法の開発、鍛錬効果のFEM解析による大型鋼塊の鍛錬効果増大と内部欠陥の圧着。
- (4) 熱処理：噴水冷却技術の開発、熱処理過程のFEM解析における熱処理条件の最適化。
- (5) 安全性評価：中心孔材料試験片の採取、JIB試験法の採用による安全性の評価と保証。

3. 同社がこの分野において、世界最高の水準に達し得た要因を整理すれば下記の通りである。

- (1) 大型鍛鋼品製造における90年に及ぶ歴史のなかで、開発され継承された膨大な技術とノウハウの蓄積があった。
- (2) 創立の経緯から、戦前は海軍の艦艇や火砲関連部材などを製造し、軍需の高度な品質要求をクリアすることで技術水準が向上した。
- (3) 地理的条件に恵まれて、大型鑄鍛鋼製造設備が戦災および賠償指定を免れ、ほとんどそのまま戦後に引き継がれた。
- (4) 大型鋼塊の健全性向上を最重点とした研究・技術開発を推進し、そのための先進設備の導入を積極的に行った。
- (5) 電力会社との共同討議を通して需要家の提示する問題点を把握し、タービン製造会社との共同研究体制を通して、問題の具体的解決方法を検討した。
- (6) 創立当初からの研究開発重視の社風によ

り、この分野では常に世界的水準の実績を挙げてきた。

謝 辞

本稿の執筆にあたって、株式会社日本製鋼所室蘭製作所および同所OBの各位には多大なご教示、ご協力をいただいた。とくに、同所室蘭研究所所長、福田 隆氏および主幹研究員小野信市氏、ならびに元研究部長、現日鋼検査サービス(株)顧問、熊田有宏氏には、文献、資料その他において大変お世話になった。また、室蘭市立図書館課長、原 敏雄氏には資料検索、貸出においてご配慮をいただいた。各位のご厚意に対して深く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 日本製鋼所：日本製鋼所社史 上巻
- (2) 同 上 ： 同 上 下巻
- (3) 同 上 ： 同 上 続編
- (4) ダイアモンド社：産業フロンティアシリーズ
－日本製鋼所－
- (5) 日本機械学会：機械工学および工業の60年の
展望
- (6) 館野万吉：鉄と鋼 vol.70, No.14, (1984)
- (7) 浜野 博ほか2名：火力・原子力発電、
vol.45, No.10(1994)
- (8) 熊田有宏：北海道産業考古学会講演資料、
1997年2月
- (9) 小野信市：北海道大学学位論文(1995)
- (10) 田中泰彦ほか8名：日本製鋼所技報、No.45,
(1990)
- (11) 竹之内朋夫：日本製鋼所技報、No.46, (1991)
- (12) Arthur：Stahl und Eisen, vol.76(1956)
- (13) Tateno, M. Shikano, S.：Jouness Int. de la
Grosse Forge, Paris(1963)
- (14) 中島敏史：高低圧一体ロータ軸の熱処理設計
－日本製鋼所社内資料－
- (15) 渡辺十郎、岩館忠雄：日本機械学会講演論文
集, vol.750-11(1975)
- (16) 渡辺十郎、村上賀国、岩館忠雄：第22回材料
強度と破壊シンポジウム論文集(1977)

(平成9年11月28日受理)