

技 術 資 料

大型鍛鋼品について

河 合 正 吉*

On the Large Steel Forgings.

Masayoshi KAWAI

I. 緒 言

わが国の鉄鋼業が驚くべき速度で生長を続けつつあることは周知の事実であるが、その一部門としての鑄鍛鋼業は、企業の宿命とも称すべき不利な需要特性およびそのために制約される不利な生産条件のために、鉄鋼業の全般的な趨勢とは対照的に全工業界の中位水準に比しても立遅れの傾向にあることは否めない。大型鍛鋼業はこの分野における代表的な企業であり、上述の宿命を一身に脊負っているかの観がある。この企業が工業発展の原動力である重工業の基礎をなすべきものであり、むしろほかの工業にさきがけて生長発展すべきにもかかわらず、宿命に屈服して遅々たる生長の歩みを続けざるを得ないということ是由々しき問題であり、現状打開は大型鍛鋼業界に課された重大課題というべきであろう。

大型鍛鋼品はかような経済的条件のもとに生産され、しかも重工業の最近における飛躍的な発展は大型鍛鋼品の品質向上に対する要求を苛酷なまでに高めつつある。つまり大型鍛鋼業は経済、技術両面よりの挾撃を受けつつあるものと見なおすことができるのである。

以下このような観点に立つて大型鍛鋼品を眺め、その特性を論じて、大型鍛鋼業の直面する矛盾に言及することとするが、本小論がその解決にいささかなりとも資するところあらば幸甚である。

II. 経済的特性

先進工業国の大型鍛鋼業はその国の重工業の発達にともない鉄鋼業の中に自然発生的に形成され、生長したものと見做される。したがつてこの企業の基礎は安定はしているものの、製品の需要が一般鋼材に比して遙かに少なく、また定常性において劣り、その製品の重要性は別として生長度の高い企業とは認められていないようである。この企業が通常は多角経営の一環として経営され、単独経営の例が極めて稀であるという事実は、この間の

事情をよく物語っているものといえることができよう。

しかるにわが国においては明治維新以来の急激なる国力膨脹と表裏をなして、軍備が拡充され、軍需と直結される機械工業（造船業を含む）が勃興し、工業の発達は自然な過程を辿る暇なく、大型鍛鋼業は重工業の需要の代りに軍需を父とし、鉄工業の代りに機械工業を母体として生まれ、軍需により育成され、軍備拡張とともに一般需要に対しては不釣合な大きさにまで生長してきたものと見做すことができる。極言すれば、わが国の大型鍛鋼業は異常な工業発展の過程において軍需と機械工業の野合の結果として生れた畸形児とも称すべきものである。

ところが第2次大戦の終結は畸形的に発達した大型鍛鋼業から一朝にしてその基盤を奪い、これに終戦後の新たな経済情勢のもとに独歩すべく再出発を強いたのである。試みに当時におけるプレス設備状況を視るに、2,000 t 以上のプレス丈でも30数基を数え、これらの鍛錬能力だけでも現在の需要を遙かに越えていたのである。したがつてわが国における大型鍛鋼業に対する需要の貧困さは倍加されているものといえることができる。

大型鍛鋼業は以上のような不利な基礎条件のもとににつきに述べるような非能率的な生産を遂行せざるを得ないのである。すなわち、

- (1) 注文生産であるために多種少量生産を行わざるを得ないこと。
- (2) 需要が少ないにもかかわらず、生産能力の大きな大型設備を必要とし、その高率稼働が困難なこと。
- (3) 大型鍛鋼生産設備には圧延設備のような機械化などによる徹底的な合理化を施行することが困難なこと
- (4) 本質的な鉄鋼生産設備以外に、生産能力が低く比較的高価な工作機械設備を必要とすること、
- (5) 複雑な熱処理、機械加工などのために工期が長い

* 三菱製鋼株式会社長崎製鋼所 工博

ちじるしく延長され、資本回転率が低下すること。などの諸点が挙げられる。以下これらについては些か敷衍して説明することとする。

(1) 多種少量生産 注文生産の結果として多種少量生産の行なわれている状況を第1表の実績によつて示すこととする。表によれば月平均400個に近い製品が鍛造され、しかもこれらはほとんど一品々々が仕様の異つた製品であるが、重量の総和は1,700tにもおよばないのである。

第1表 多種少量生産の実例

生産月	機械加工品		打放品		半成品		全鍛鋼品	
	重量 t	個数	重量 t	個数	重量 t	個数	重量 t	個数
A	985	213	300	37	444	143	1,729	393
B	1,023	191	397	53	201	123	1,621	367
平均	1,004	202	349	45	323	133	1,675	380

(2) 大型設備の低稼働率 大型鍛鋼品を生産するためには必然的に各種の大型生産設備を必要とする。しかしながら製品の大きさが一品毎にことなるために大型設備の負荷率を高水準に維持することが不可能であるばかりでなく、大型製品のみでその生産能力を充足することは不可能であるから、大型設備の稼働率を維持するために余剰生産能力を中小型製品によつて消化し、いわば牛刀割鶏の類の非能率的な生産を行わざるを得ないのである。例を製鋼設備にとれば、炉線が困難であり、1溶解当りの平均出鋼量を公称能力の80%程度に維持するのが精々であり、また大型鍛鋼品に中小型鍛鋼品を加えることはいうにおよばず、さらに鑄鋼品と一緒にした全鑄鍛鋼品を考えてみても、これのみで製鋼能力の40%を消化することはなかなか困難である。この一点丈を捉えてみても、大型鑄鍛鋼品の単独生産による経営の困難性が了解されるであろう。この際蛇足ながら小型製品のみを生産する場合には設備の生産能力の消化には差したる困難を感じないことを附言しておく。

(3) 設備合理化の困難性 大型鍛鋼品およびその生産設備の特性と、多種少量生産方式とは徹底的な設備合理化を困難にし、逐年高騰しつつある労務費の圧迫に対し企業をして無抵抗状態に陥れつつあるものということができる。

(4) 工作機械設備の負担 第1表の実例が示すように鍛鋼品の過半は製造者側における機械加工を必要とする。ことに最近の需要傾向より製造者側においてその機械加工深度を一層深くすることに対する使用者の強い要求が看取される。機械加工は製造者側にとつては主と

して鍛鋼品を納入するためのみの、また使用者側より見れば組立品を製作するという大きな目的のための補助的作業であり、それ自体に大きな附加価値造成能力を期待することはできない。したがつて工作機械設備への投資はいわば犠牲的投資であり、いずれの側でも積極的な企業意図によつて決定されるものではない。しかし犠牲的投資とはいえ両者の間には次のような大きな差が見られる。すなわち使用者の場合には犠牲を必要とし、また犠牲を補うべき組立という具体的な目的があるのに対し、製造者の場合には需要確保という目的があるばかりで、犠牲を積極的に補うべき何もものもないのである。しかも需要過少の状態のものとは、機械加工の分担の際に使用者は顧客としての有利な立場を利用することができるのである。

以上のような理由により原則的に使用者側で設置する工作機械は必要不可欠のものか、あるいは他力本願ではいざという時に間に合わなくなる危険を考慮して自己防衛的に設置するものかいずれかであり、使用者が設置すべき工作機械を必要最小限度に抑えんとすることは自然の成行に過ぎないのである。他方使用者の最近の増産計画の傾向を視るに、従来のように漸進的ではなく飛躍的である。したがつてこの計画を実行するためには龐大な資金の調達を必要とするから、各局面での資金の節約、ことに本質的に消極的な投資と見做される工作機械に対する投資々金の節約が考慮されることは当然であり、使用者は従来ならば当然設置すべき工作機械でもこれを省略して、製造者の工作機械によつて加工を代行せしめんとするであろう。これが最近の需要傾向となつて現われているものと解することができる。

製造者たる大型鍛鋼業がその生長を計るためには、上述のように使用者におけるよりも遙かに消極的な工作機械への犠牲的投資を余儀なくさせられるということは大型鍛鋼業の直面する諸矛盾の中で最大の矛盾といふことができる。勿論工作機械の整備はそれが企業経営にとつて大きな負担とならない限りにおいては有形無形のメリットを具えている。しかしながら大型鍛鋼業にとつては大型工作機械への投資は重大な負担とならざるを得ないのである。工作機械は高価な割りにその生産能力は低いから、加工による大きな附加価値が期待できない限り、工作機械への投下資本の回転率は低からざるを得ない。したがつてまた本質的な鉄鋼生産設備の大きな生産能力に見合う工作機械能力を具えるためには龐大な資金を必要とするから、多くの場合大型鍛鋼品の生産能力は工作機械能力によつて限定されることになり、余剰能力をもつて鍛鋼品の増産を計画すれば、これに要する資金はほ

とんど工作機械に食われてしまうのである。これが大型鍛鋼業の大きな負担となり、その生長を阻害し、ほかの鉄鋼企業との大きな格差となつて現われているのである。

斯様な事情を定量的に説明するためにつぎのような諸例により投資効果を比較する。まず大型鍛鋼品の生産設備としては組立型曲軸の工作機械設備を例にとる。この場合製鋼および鍛錬設備には余力があり、大型旋盤を中心とする一連の工作設備により打放重量で 1,550 t/y の曲軸が増産される。これに投下される資金は 450 百万円であり、曲軸の価格を 200 千円/t とすれば年生産高は 310 百万円/y となり、投下資本の回転率は 310/450 (=0.7) 回/y となる。比較すべき設備として製鋼設備および圧延設備をとり、それらの詳細は工作設備とともに第 2 表に掲げた。表より工作機械設備と本質的な鉄鋼生産設備との間に生産能力および回転率に関してはいかに大きな開きがあるかが判る。工作機械設備の回転率はほかの設備の約 6 分の 1 に過ぎないのである。かような低い回転率は投資の採算性をいちじるしく悪化させる。その理由はつぎのとおりである。

今投下資本額を C とすれば、これは原則的に長期借入金によつて賄われるから、その金利の年額 I は

$$I = 0.09C$$

で与えられる。また生産設備の法定減価償却年数は設備の種類によつてことなり、 F_i なる設備の設備費を C_i とし、その償却年数を n_i とすれば、定率償却を行う場合の償却率 δ_i は

$$\delta_i = 1 - 10^{-1/n_i}$$

で与えられ、

$$C = \sum C_i$$

よつて全生産設備の初年度の減価償却費 D は

$$D = \sum \delta_i C_i = \bar{\delta} C$$

となる。ここに $\bar{\delta}$ は各設備に対する平均償却率を意味するが、上述の 3 種の総合設備に対しては概算のためには平均償却年数を 20 年として差支えないものと考えられ

第 2 表 資本回転率の比較

生産設備	主 要 生産設備	生産能力 t/y	生産高 百万円 /y	投 下 資本額 百万円	回 転 率 回/y
組立型曲 軸工作 設 備	大型旋盤	1,550	310	450	0.7
製鋼設備	50 t 電気炉	60,000	2,000	500	4.0
圧延設備	熱間スト リップ圧 延機	1,200,000	54,000	13,000	4.2

る。よつて $\bar{\delta} = 1 - 10^{-1/20} = 0.11$ とし

$$D = 0.11C$$

が得られる。したがつて

$$I + D = 0.20C$$

つぎに年生産高を S とすれば、資本回転率 ρ は

$$\rho = S/C$$

で表され、 S に対する $I + D$ の比は

$$\lambda = (I + D)/S = 0.2/\rho$$

となる。 $I + D$ は経営におよぼす投資の負荷であり、 S は投資の効果であり、いわば負荷を負うべき断面積と考えられるから、 λ を投資応力と呼ぶことができよう。上述の計算は投資応力が回転率に逆比例することを示している。しかして λ の実数値は製鋼および圧延設備に対してはそれぞれ 5.0% および 4.8% に過ぎないが、工作設備では 29.1% に達することが判る。かような投資応力の実数値は利益率と対比して考慮されるべきであり、工作設備における 30% にも達せんとする高投資応力は生ずべき利益を抹殺し、投資の効果がマイナスになる危険を予告するものである。

(5) 工期の延長 一般に大型鍛鋼品の製造に要する期間は長く、中には 7 ヶ月にもおよぶものもある。この主因は機械加工と熱処理とにあるが、入念な鍛錬作業と検査とに相当な時間が費されることも無視できない。この長い工期が資本回転率を低下させることはいうまでもないが、他方において運転資金の金利をも増加させるのである。この影響を評価するために工期に 5 ヶ月の差のある場合を例にとつて、金利の差を計算してみることとする。まず製造の初期に製造費の過半が投下されることを考慮し、実績を検討した結果、製造原価を C とすれば、見掛の元金は $0.8C$ とすればよいことが判つた。よつて金利を 2.1 銭/d とすれば、金利 I は

$$I = 0.8C \times 0.00021 \times 150 = 0.025C$$

となる。すなわち製造原価は潜勢的に 2.5% 丈高騰することになるのである。この数値はあるいは些細に見えるかも知れないが、この程度の原価切下げを行わんとする時の苦勞を思えば、この負担の重さを感じることができよう。

以上のような大型鍛鋼品の特性に帰因する不利な生産条件は、当然価格の面で補われるべきであるが、需要過少という絶対的条件の下では、営業活動の成果に対して多くを望むことはできないのである。

III. 技術的特性

前述のように大型鍛鋼業は経済の面のみならず、技術の面からも激しい攻撃を受けつつある。何となれば最近

の重工業の発達には製品の大きさ、稼動速度および温度などの飛躍的上昇となつて現われており、その重要部品である鍛鋼品は益々大型化し、またその性能に対する要求は苛酷化の一途を辿っているからである。

大型鍛鋼品が第一に満足しなければならない必要条件は健全性の確保、すなわち有害な欠陥を含まないことである。さらにその性能に対する酷しい要求を満足して初めて製品として必要にして十分なる条件を満足するのである。鍛鋼品の健全性の確保はその大きさが増加するにしたがつて加速度的に困難となるが、使用条件の酷しさのために大型製品ほど些細な欠陥でも問題になりやすい。また大型製品は鍛錬効き果も効きにくく、熱処理効果も不十分になりやすく、偏析の程度も大きくて材質の均一性が保証され難いから、所要の性能を満足することが困難となる。大型鍛鋼品は従来より鉄鋼製品中最も製造困難な製品として認められてきたが、最近の苛酷な要求と大型化とはこの困難性を一層高めつつあるのである。したがつて大型鍛鋼品の生産は高級な製造技術と技能をもつてしても常に廃却の危険に晒されており、これが大型鍛鋼業経営上の大きな負担となり、しかもその荷重が増加しつつあるのである。

以上大型鍛鋼業の技術的側面に一瞥を加え、技術的諸問題の検討に移ることとする。

1. 製鋼技術

(a) 精錬 従来は高級な大型鍛鋼品の製造に際し溶鋼中のガスの処理就中水素の処理が精錬上の最大の問題であつたが、溶鋼の真空処理法の出現により、水素の問題は一応第一線から引き下つたといつても過言ではない。むしろ精錬の重点は精密な化学成分の調整、真空処理法の成果を全からしめるための P, S の徹底的な除去、溶鋼温度の制御などに向けられるようになったのである。真空処理法の採用により従来の大型鍛鋼品の製造に最適と見做されていた酸性平炉の代りに大型電気炉が重用されるようになった事実はこの間の消息をよく物語っている。何となれば電気炉によればその最大の欠点と見做されていた低濃度に抑制し難い水素の処理は真空処理に委ね、最大の特長である化学成分の調整、P, S の除去、温度制御に対する高性能が活用できるからである。さらに誘導攪拌装置の発達はかような操業に対する大型電気炉の適合性を一層高めたものといふことができる。

(b) 造塊 以上のように精錬上の問題は真空処理法の出現により非常に簡明化しつつあるのである。したがつて製鋼作業において造塊の役割りが大きくクローズアップされるようになったのである。現在の処高級な大型

鋼塊の造塊には溶鋼の真空処理法として代表的な流滴脱ガスを行う真空造塊法を適用するのが普通である。

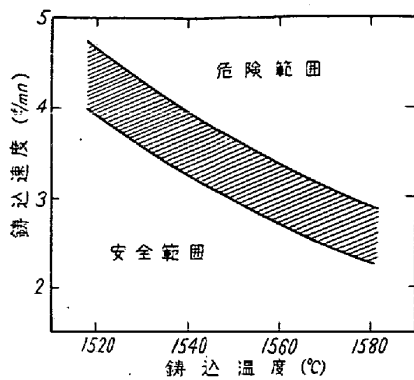
従来の空気造塊法はいうまでもなく溶鋼を空气中で鋼塊鑄型に注入し、爾後はそのまま自然に（頭部加熱は別として）凝固させるという原始的かつ消極的な方法に過ぎず、積極的に制御するものは鑄込温度と鑄込速度とのみである。したがつて空気造塊法においては鑄込温度および速度が最も重要な因子と見做されていた。真空造塊法においても凝固そのものの制御は不可能であるから、これらの因子の重視されることには変りがないが、真空造塊法の特徴として真空度がもう一つの重要因子として追加される。

真空造塊の際には溶鋼鑄流が真空中に噴出されると、外圧の消失により鑄流中でのガス反応の平衡が破れて激しい沸騰が起り、鑄流は滴化し、落下するにしたがつて円錐状に散拡して鑄型内に這入る。若しこの流滴が鑄型壁に衝突し附着すればいわゆるダブルスキンを生じ、鍛錬の際に表面欠陥となつて現われる。この流滴の散拡度は鑄込温度および真空度が高いほど大となる。したがつて最大の目的である脱ガス効果の大なることをねらつて真空度を高くすれば、鑄込温度を低く抑えて危険な鑄込を行わざるを得なくなる。この不便を解消するために鑄流の噴出口（ノズル）直下に耐火性漏斗を取付ける方法が各処で採用されるようになった。この際脱ガス効果の減殺が懸念されたが、実績はそれが杞憂に過ぎなかつたことを示した。かくして真空度と鑄込温度との相互制約作用は解除され、両者は自由に調節されるようになったのである。

(c) 角隅偏析 鑄込温度が高いほど、また鑄込速度が速いほど角隅偏析の生じ易いことは古くから知られていた処であるが、真空造塊の際にもこの傾向には変りはない。著者が大型含 Ni 鋼塊について経験した結果を模式的に図示すれば第 1 図の通りである。すなわち図中斜線部は限界範囲であり、その上下がそれぞれ危険範囲および安全範囲となつている。

角隅偏析は軽微な場合には殆んど問題にならないが、激しくなるにしたがつて鍛鋼品の弱点となり、終には鍛錬の際に相当深い縦割れとなつて現われ鍛鋼品の死命を制するようになる。経験的に鋼中の Ni は角隅偏析に対する感受性を増大させることが知られている。また精錬の際の P, S の徹底的な除去の 1 つの目的は角隅偏析の防止にある。角隅偏析の現われる位置に関しては鋼塊底部ほど激しくなる傾向がある。

つぎに角隅偏析の生成機構について言及することとす



第1図 大型真空鋼塊の角隅偏析と铸込条件との関係

る。すなわち铸込中の凝固の進行過程を視るに、鋼塊底部より次第に凝固殻を生ずるが、その厚さが薄い間は殻の温度も高く、弱い凝固殻は溶鋼圧のために铸型壁に押しつけられているが、殻の厚さが厚くなるとともにその温度も低下すれば、溶鋼圧に耐え得るようになり、铸型の膨脹は凝固殻の収縮と相俟つて凝固殻を铸型壁から分離せしめ、その間に空隙を生ぜしめる。しかる時铸型への熱伝導効果が低下して凝固殻は再加熱され、その強度が低下するであろう。この際铸込温度が高いほど铸型の膨脹が大であるから、凝固殻は分離しやすく、分離後の再加熱による凝固殻の強度低下が顕著になりやすく、また铸込速度が速いほど溶鋼圧が高く、凝固殻の破れる危険性が增大する。そして凝固殻の溶鋼側に対して凸なる部分には圧縮応力が働くから問題はないが、角隅部附近のように凹なる部分には引張応力が働き、とくに柱状晶の排列の乱れる箇所は弱点となるから選択的に破断するであろう。かようにして生じた破壊部のP、Sなどで充てられた溶鋼で充填されたものが角隅偏析にほかならない。

角隅偏析に対するそのほかの重要因子として鋼種、鋼塊の長径比および径の絶対値、铸型の熱容量を支配する壁厚、角隅の曲率半径などが考えられるが、とくに後者について J. THOMSON¹⁾ は角隅を適度に鋭くすることを推奨している。その基準として次式を与えている¹⁾。

$$r = (6/100)R + 1/2 \text{ in}$$

ここにRは铸型の半径、rは角隅の曲率半径を表すものとする。

(d) そのほかの偏析 鋼塊Δ、Vおよび樹枝偏析の一般的事項に関しては著者の報告²⁾に譲ることとするが真空造塊法もこの偏析特性に関しては差したる影響は与えないようである。しかし著者の経験によれば後述するΔ偏析帯の拡大、したがつてまたV偏析帯の縮小の傾向が見られ、偏析部の健全性に対して相当な効果が認めら

れる。またほかを顧慮する必要が少ないので思う存分に行われるP、Sの徹底的な除去も偏析軽減に役立つであろう。

(e) 凝固時間 鋼塊の引抜時間決定の目安を与えるために著者の鋼塊の凝固時間の計算方法を紹介しておく。各種の計算および実験によれば、鋼塊の表面は铸型のチル効果によつて急速に冷却してほぼ1,200°Cに達するが、その後表面温度はやや上昇することが知られている。この事実はこの時期における凝固殻と铸型との分離による凝固殻の再加熱を物語るものといえよう。さらに凝固が進めば、勿論鋼塊表面は再び冷却を開始するが、この冷却は分離の結果生じた空隙のために著しく渋滞する。よつて計算を簡略にするために鋼塊の表面温度は凝固が完了するまで1,150°Cに保持されるものとする。また実測によれば凝固中の殻内の温度勾配はほとんど直線的であるから、鋼塊凝固中の温度分布を第2図によつて表す。図において

- T_0 : 溶鋼の初期温度
- T_c : 凝固温度 (=1,480°C)
- T_s : 表面温度 (=1,150°C)
- δ : 凝固殻の厚さ

とし、また

- C_L, γ_L : 溶鋼の比熱および密度
- C_s, γ_s : 凝固殻の平均比熱および密度
- k : 凝固殻の平均熱伝導度
- A : 溶解熱
- ΔT : 過熱温度 (= $T_0 - T_c$)

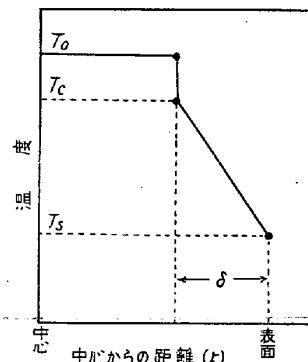
とおけば、凝固温度 T_c を基準温度とした鋼塊の単位長さの熱含量Qは

$$Q = \pi [(R - \delta)^2 \gamma_L (C_L \Delta T + A) - C_s \gamma_s (T_c - T_s) \delta (R - \delta/3)]$$

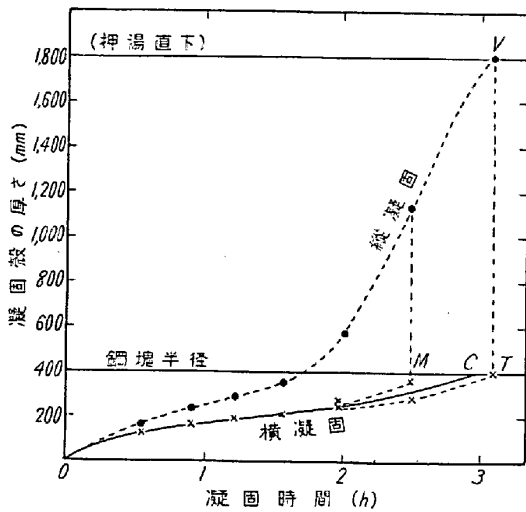
よつて熱伝導方程式

$$dQ/dt = -2\pi k R (T_c - T_s) / \delta$$

より、



第2図 凝固中の温度分布模型図



第3図 R=0.4m の場合の実測と計算との凝固曲線

$$t = p\delta^2(1 - q\delta/R)$$

が得られる。つぎに

$$C_L = 185 \text{ kcal/t}^\circ\text{C}, \quad C_S = 165 \text{ kcal/t}^\circ\text{C},$$

$$k = 25 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C},$$

$$\gamma_L = 7.0 \text{ t/m}^3, \quad \gamma_S = 7.5 \text{ t/m}^3,$$

$$A = 65,000 \text{ kcal/t},$$

$$\Delta T = 75^\circ\text{C}$$

とすれば、

$$p = 45.8, \quad q = 0.6$$

となる。R=0.4m の場合の t-δ 曲線を上式より求めれば、第3図のC曲線が得られる。図中曲線MおよびTはそれぞれ実測によつて求めた中央部および押湯直下の横凝固曲線である。V曲線は参考までに掲げた縦凝固曲線である。曲線MおよびTはC曲線より凝固終期において偏倚しているが、これはそれぞれ縦凝固の加速効果および押湯の減速効果を表わすものと考えれば、理論値と実測値の一致はきわめて良好であるといふことができる。

つぎに凝固終了時間 t_s は上式に δ=R を代入して求められるが、押湯の効果を考慮して修正を加える必要がある。たとえば理論式より求められる時間の 20% 増とすれば

$$t_s = 22R^2$$

が得られる。

さらにこの式に基いて引抜時間 t_{st} の目安を見積ることとする。この際まず考慮すべきことは頭部加熱の効果である。また凝固の際に生ずる偏析部の凝固についても余裕時間を与えなければならない。著者が調査した20t 鋼塊でも、偏析線には多量の硫化物が含まれるのみなら

ず、明かに燐化物も含まれており⁹⁾、さらに C, O などの富化も見られるから、相当な凝固温度の低下が推論される。大型鋼塊では1,250°C 程度まで下ると断定を下している研究者もある。よつて 60% 程度の安全率を考慮し、t_{st} を t_s の 60% 増とすれば、

$$t_{st} = 35R^2$$

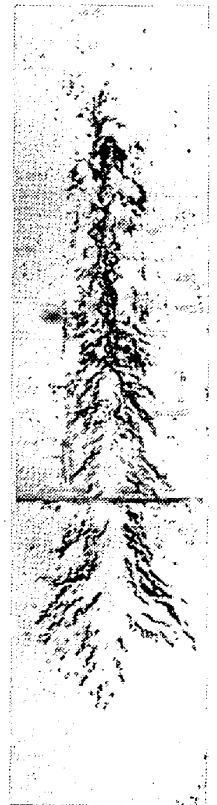
が得られる。しかしかような関係が大型鋼塊に対して真に妥当なものであるか否かを確かめるような実験は経済的な理由により実現されなかつたし、今後も仲々実行困難であろう。

(f) 砂疵および中心多孔性 終りに現在のところ大型鍛鋼品に現われる欠陥の大宗をなす砂疵と中心多孔性について述べる。真空造塊法はこれらの欠陥を軽減する効果はあるが、完全な対策とは見なされないのである。砂疵の発生原因は複雑多岐にわたっているから。真空造塊法は空気造塊法に比べて鑄込時の鑄流の酸化防止および効果的な脱酸素が可能であり、砂疵発生要因の部分的な抑制には役立つが、ほかの要因に対しては空気造塊法と同様にほとんど無力である。なお補足的ではあるが、真空造塊法の場合には比較的高温高速鑄込が行われるから、このこと自体少くとも砂疵に関しては不利ではなからう。また最近の耐火物の発達も砂疵防止の一助となるであろう。

つぎは中心多孔性の問題である。これは造塊対策上最も困難な問題である。この欠陥は鋼塊が大きくなるにしたがつて発生しやすく、経験的に 60~70 t を境として防止が困難になることが知られている。また鋼の炭素含有量あるいは合金量が増加するにしたがつて中心多孔性に対する感受性が大となり、高炭素鋼ないしは高合金鋼では 4~5 t 程度の小型鋼塊でも欠陥防止が困難となる。第4図は大型鋼塊の中心部のダイヤモンド試験で現出したこの種欠陥の1例である。

中心多孔性は鋼塊の中心部に発生する収縮孔群と見なされるが、この収縮孔はV状偏析中に発生する収縮孔と樹枝状晶が鋼塊中心まで生長を続ける場合に中心線に生ずる収縮孔とより成るものと考えられる。

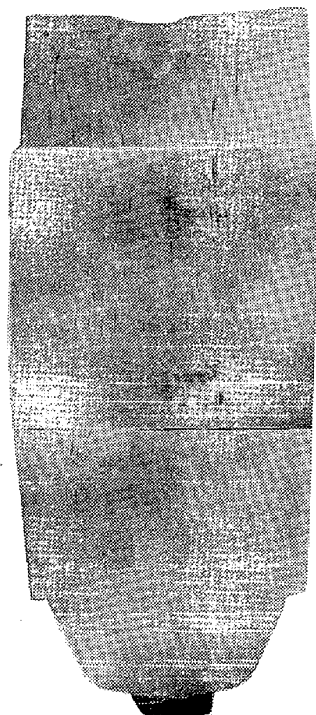
一般に鋼塊の中心部に形成される



第4図 大型鋼塊に現れた中心多孔性欠陥の1例

自由晶帯の径が太い場合にはV状偏析は傾斜が少なくなり、偏析中の欠陥は軽微な傾向がある⁹⁾。また E. WULFFERT⁹⁾ は鑄込温度が高いほど凝固中の鋼塊内部における溶鋼中の温度勾配が少なくなり、樹枝状晶の発達を抑えられて自由晶帯の形成が容易になるために中心多孔性が軽減されることを実例によつて示している。さらに鋼塊鑄型の設計において高径比を小さくし、テーパを大にし、底部の冷却効果を効かして指向性凝固を促進することが自由晶帯の発達を容易にすることとなり、中心多孔性防止に有効であると考えられている。しかし著者の経験によればこれらの定石的手法が支障なく通用するのは中小型鋼塊に限られるものようである。すなわち鋼塊の大きさが増加するにしたがつてV状偏析の多孔性感受性が増大し、また鍛錬効果も効き難くなるから、自由晶帯を拡大することは多孔性の現われる危険箇所の範囲を拡大することとなり、中心多孔性に対しては中途半端な対策となる惧れがあるのである。

他方真空造塊においては真空処理によつて強裂な脱酸が行われるから、鋼塊中心部の凝固の際に自由晶の発生核が少なく自由晶の生成が抑制されるであろう。したがって樹枝状晶の生長が最後まで続き、鋼塊の中心線近傍まで樹枝状晶帯の拡がるのが推論される。第5図は71t



第5図 71t Ni-Mo-V 鋼真空鋼塊縦断面の硫黄写真

Ni-Mo-V 鋼真空鋼塊縦断面の硫黄写真を示すものであるが、△偏析線が鋼塊中心線附近まで分布し、V偏析が押湯直下に押込められていることが観察される。この事実は真空造塊の自由晶帯におよぼす影響に対する上述の推論をよく裏書きしている。高級な大型鍛鋼品として代表的な火力発電設備用発電機軸およびタービン軸では設計上必ずしも必要ではない中心孔を設けることが規定されている。これは多孔性欠陥の残留する惧れのある鍛鋼品の中心部を削除し、しかもその箇所に肉眼的に検査するための手段と解釈される。

普通の鍛鋼品の場合には中心部の軽微な欠陥は問題にならないが、これらの鍛鋼品では使用条件により中心

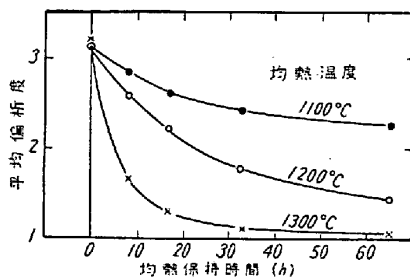
部の健全性がとくに重視されるのである。現在の技術水準では大型鋼塊の中心多孔性を完全に防止することは困難であり、勿論場合によつては無疵の鍛鋼品も得られるが、工業的生産を遂行するためには上述のような穿孔という予防処置をとらざるを得ないのである。したがって現状においては鋼塊の多孔性中心部の径を可及的細くするように努力するのが合理的と考えられる。中心多孔性の1因は恐らくガスであろうし、また脱ガスを徹底的に行えば上述のように多孔性部の範囲も狭くなるであろうから、真空造塊の際に極力真空度を高くするように努力すべきであり、かくすることにより真空造塊を活用することができるのである。

最近米国において容量 27 t の消耗式電極真空溶解炉が操業を開始したことが報ぜられているが、その容量増加には根本的な困難は存在しないものと考えられる。この場合には造塊条件が根本的に改善されるから、この方法による中心多孔性の問題解決に大きな期待を寄せることができるが、製造費の嵩む欠点のあることを忘れてはならない。

2. 鍛錬技術

(a) 鍛錬効果 鍛錬の目的は鋼塊に所要の形状を与え、しかも材質改善を行うことにある。ここに材質改善とは鋼塊に不可避免的に存在する弱点ないしは欠陥の状態を改善することを意味する。かような材質改善効果は加熱および成形過程に求められる。これらの効果をそれぞれ加熱および成形効果と呼ぶこととする。

鋼塊を加熱したり冷却したりすれば熱応力および変態応力が発生し、この応力が高い場合には鋼塊の健全性の損われる惧れがある。前述のように大型鋼塊には欠陥が生じやすく、また寸法効果のために応力も高くなるために、これを鍛造状態のまま冷却したり加熱したりすれば欠陥の拡大若しくはこれを起点としての破壊の危険が大となる。よつて大型鋼塊は造塊後赤材のまま(表面温度 600°C 以上)鍛錬加熱炉に装入するのが原則である。これによつて最も危険な低温における冷却および加熱をさけることができる。したがって赤材加熱とする限り大型鋼塊でも昇温にはあまり問題はなく、たとえば簡単な Stanfield の式を昇温作業指針として支障なく適用することができる。大型鋼塊の加熱作業で重視すべきはむしろ均熱保持条件である。何となれば鋼塊を適正に均熱保持すれば、偏析部よりの偏析成分の拡散による均質化すなわち材質改善が達成されるが、これを誤れば材質劣化を結果するからである。A. KOHN⁹⁾らは放射性Pを用いて樹枝状偏析におよぼす均熱保持条件の影響を調査した



第6図 均熱保持条件の均質化に及ぼす影響

がその結果を第6図に要約する。図中平均偏析度1は完全均質を意味する。図によれば均熱温度を1,300°C 近くにとれば能率的な均質化の達成されることが判る。しかし均質化のみに着目して鍛錬の初期から均熱温度を高くすれば、前述のように溶融点の低い偏析部が再溶融し、鍛錬時に欠陥となる危険がある。よつて初期の加熱温度は最高1,200°C程度とし、偏析部の均質化したがつてまた溶融点の上昇を計り、比較的低温のための遅い均質化は長い保持時間で補い、鍛錬過程の進行に伴つて漸次保持温度を高くするよう配慮すべきである。なお加熱による水素の拡散逸出も加熱効果の一つと見なされる。

つぎに成形効果について述べることにする。これについては著者はすでに報告した⁷⁾ことがあるから略述するに留めることにする。さて成形の際に直観的に期待される結果として欠陥の圧着効果と、弱点および欠陥の変形効果とが考えられ、成形効果はこれら2効果によつて合成されるものとする。鋼塊中の欠陥は加圧により変形しつつ縮小し、終りには消失するであろう。かような圧着効果は加熱温度が高いほど大きく、また鋼の変形を完全に拘束し、水圧の圧力を加えることによつて最も効果的に現われる。欠陥あるいは非金属介在物、偏析などの弱点が成形のために変形すると、鋼の機械的性質は伸された方向では改善されるが、これと直角方向では劣化し、方向性が現われる。

したがつて鍛錬成形の際には極力圧着効果を大にし、使用条件に適合するように変形効果を与えなければならない。圧着効果を大きくするためには、たとえば加熱温度を高くしたり、あるいはまた鍛錬工具の選定に留意することが肝要である。火力発電用軸類の場合には軸方向に直角な方向に対する機械的性質が重視されるから、軸方向への極端な鍛錬成形比を与えないように変形効果を調節することが必要になる。また鍛鋼品の均質性を確保するためには内外部の変形が均一になることが必要であるが、このためには加熱温度の均一化(芯温の低いことが最悪)を計り、鍛錬工具の選定を誤らないようにしなければならない。

(b) 鍛錬機的能力 鍛錬機的能力に関しては参考までに西独における第2次大戦後の大型鍛錬機復旧の経緯⁸⁾に言及することとする。

終戦前に稼動していた独逸最大の15,000t プレス2基が撤去されたために、再建に当りプレス能力をいかにすべきかが議論された。検討の結果6,000tで十分ということになったのである。その主な理由はつぎのとおりである。すなわち成形上大容量のプレスを絶対的に必要とする鍛鋼品は化学工業用高圧中空筒(ないしはボイラードラム)だけであり、この種の鍛鋼品は溶接技術の発達により近い将来鋼板の溶接組立品で完全に置換されることを予測したのである。

一般に鋼塊の欠陥の程度がある限度を越えると、プレスの能力を極端に大きくしない限り、この鋼塊を有用な鍛鋼品に打上げことは不可能である。逆にまた欠陥がある限度以下であれば、鍛錬機的能力の差はその改善効果に余り影響を与えないのである。一方大型鋼塊の健全性が、真空造塊法を中心とする最近の製鋼技術の進歩により、完全とはいえないまでも著しく改善されたことには異議を挟む余地はない。真空造塊法の開祖ともいべきBOCHUMER VEREINが4,500t プレスによつて150t鋼塊を鍛造している事実は、真空鋼塊の欠陥が上述の限度以下に管理されていることを物語るものといふことができよう。すなわち真空鋼塊を対象とする限り超大型プレスは必ずしも必要ではない。他方超音波試験などの検査技術の発達により、製品個々の健全性の確認が可能となり、プレス能力不足に対する潜在的な不安は解消され、また過大なプレス能力は不経済的であるから、必要にして十分なプレスというものがでてくるはずである。この意味において前述の6,000tという能力選定は正に当を得たものといふことができよう。

(c) 鍛錬作業 終りに実際の鍛錬作業について火力発電用の大型軸類を例にとつて説明する。これら鍛鋼品の主要鍛錬作業は据込と鍛伸とである。

据込鍛錬の第1の目的は鋼塊の軸と直角方向に疵面を有する欠陥(あるいは球状な欠陥)を圧着することにある。A. TOMLINSON⁹⁾などは据込成形比が小なる場合には軸方向の疵面を有する中心部欠陥に対しても圧着効果の現われることを明らかにしたが、大型鍛鋼品ではかような圧着効果を期待することは困難であろう。何となれば大型鍛鋼品にはそれ程効果のあるような据込は施行し難いからである。またこれらの軸類は高速回転体として使用され、軸方向と直角な方向の機械的性質が重要であるから、鍛伸成形比を普通の鍛鋼品ほど大きく与えることが許されない。したがつて鍛伸のみでは鍛錬効果が不足

しがちなために、据込によつてこれを補わんとするのである。

鍛伸作業は製品に所要の形状を与える主作業であるが大型鋼塊に発生しやすい中心多孔性欠陥を軽減ないしは消失させる効果は主として鍛伸効果に求めるほかはない。しかし上述のように大きな鍛伸成形比は許されないから、中心多孔性の完全消失は一層困難になることを忘れてはならない。成形比としては据込成形比 1/2 程度、鍛伸成形比 1/3 程度にとることが好ましい。

なおこれら軸類の鍛伸作業においては最後に本体を鍛伸すると所要の成形精度を確保することが困難なために軸部を最後に鍛錬するのが普通である。この場合には本体部は鍛錬温度に加熱され過熱組織のままつぎの工程である調質焼鈍処理を受けることになる。しかし大型鍛鋼品ことに本体部のような大径部はその質量効果のために熱処理効果が効き難く、過熱組織は仲々改善されない。

よつて軸部の最後の鍛伸のための加熱温度は可及的低くし、組織の過熱状態を軽くしなければならない。あるいはまた調質焼鈍の際の比較的強烈な処理によつてこれを補うか、場合によつては成形精度をある程度犠牲にして最後に過熱組織を破壊するために本体部に修正鍛伸を加えるか、いずれにしてもなんらかの対策を講ずる必要がある。

なお鍛錬作業に対して徹底的な合理化の行い難い根本的な理由についてはすでに述べた通りであるが、かような困難な条件のもとに達成された合理化としてプレス操作機構の改善および作動の高速化、マニピュレーターの採用、加熱炉操炉の自動化、補助的成形作業としての能率的なガス切断加工の採用などが挙げられる。

3. 熱処理技術

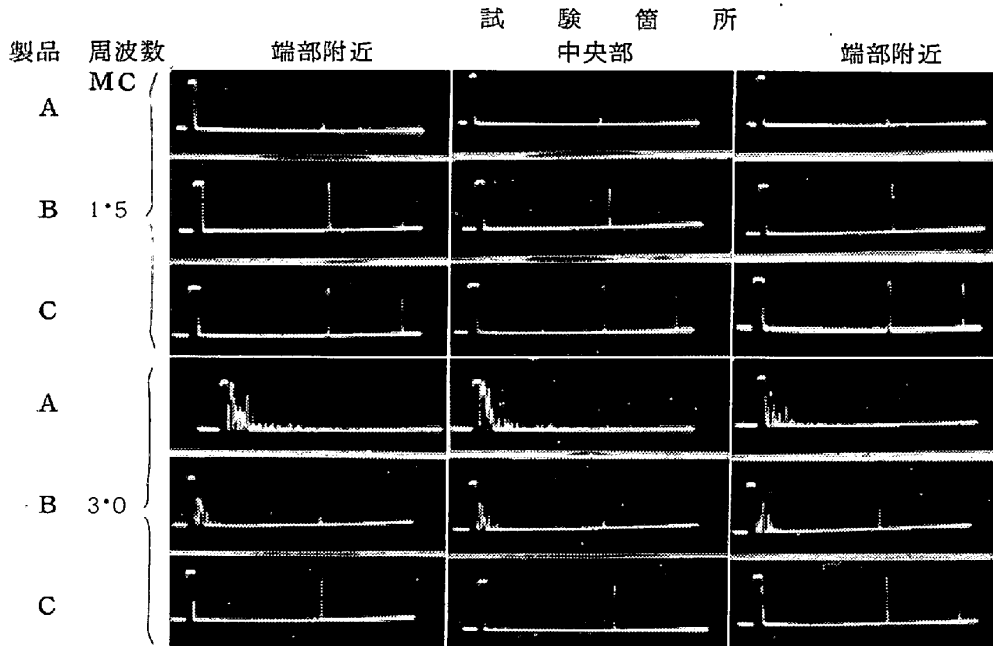
(a) 調質焼鈍 1935年特殊鋼に発生する毛割れ状欠陥(白点)の主因が水素であることが判明したが、これは鉄冶金学における歴史的成果の一つと見なされる。この発見に基づいて白点に対する諸対策が理論的に究明されたが、小型製品に対してはこれら諸対策が理論通りに適用されやすく、この問題は比較的容易に解決されたのである。しかし大型鍛鋼品の場合には理論と実際との間に大きな壁が立塞がり、この解決は1950年頃まで持越されたのである。この解決の鍵は鍛錬後の熱処理法の確立にあつたのである。著者はこの熱処理を調質焼鈍と名付けた。

鋼はフェライトの状態の方がオーステナイトの状態よりも水素の溶解度が低く、水素の拡散係数値も A_1 点直下で $1,200^\circ\text{C}$ のオーステナイトの状態のそれに匹敵する。よつて鋼のこの特性を利用して、鍛造直後鍛鋼品を

常温まで冷却することなく、可及的速かにしかも完全に γ - α 変態を終了させ、 A_1 点直下に長時間保持すれば、鋼中の水素除去を効果的に行うことができる。しかしこの処理の安全を期するためには、この処理の中に予備的調質処理を包括させ、鋼にある程度の靱性を与えて水素の欠陥造成作用に対する鋼の耐性を増加せしめる必要がある。他方大型鍛鋼品はそのほかの欠陥に対しても感受性が強く、しかもその製造には長い工期を必要とするから、欠陥が若し工期の終り頃に発見されるようなことになるとはなほだしい工期遅延を引起し、使用者に多大の迷惑をかけることになるから、健全性の確認は可及的早期に行うことが望ましい。健全性の判定には超音波試験が最適であり、早期判定の時期としては調質焼鈍直後を選ぶほかはない。超音波試験による健全性判定の精度は判定時の鋼の組織状態により、鋼の組織が微細なほど超音波の透過性がよくなるから判定の精度が高められる。したがつて鍛鋼品の健全性を可及的確実に早期判定を行うためには調質焼鈍における調質効果を許される範囲内で大きくするように努めなければならない。また前述のように大型鍛鋼品の組織は鍛造後過熱組織になりやすく、この過熱組織は大きな質量効果のために改善され難いから、調質焼鈍の際に十分な予備的調質を行い、最終熱処理の負担を軽くしておかなければならない。著者が鍛錬直後に施行されるこの熱処理を調質焼鈍と名付けた所以はここにあるのである。調質焼鈍の目的は以上のように複雑多岐にわたるものであるから、各製造者はその大綱においてはほとんど差はないがそれぞれ工夫を凝らした独得な製造方案を設定したのである。これによつて1935年水素説が発表されて以来約15年にして始めて本格的な大型高級鍛鋼品の製造技術が確立されたのである。

しかしこの水素物語はそれで終止符が打たれた訳ではなく、その直後に真空造塊法が確立され、大型鍛鋼品の製造技術はさらに飛躍した。この真空造塊法の出現はようやくにして生れた調質焼鈍の声価をいちじるしく低め、水素除去に関する限り調質焼鈍の価値を減殺したが真空造塊法といえども万能ではなく、前述のように欠陥の完全防止を約束するものでもなく、また鋼の調質性に根本的な変化を与えるものでもない。したがつて調質焼鈍の健全性の早期判定および予備的調質効果に対する重要性は依然として失われてはいない。したがつて真空鋼塊より鍛造された鍛鋼品に対しても調質焼鈍を省略することはできない。ただし真空造塊以後の調質焼鈍は以前のそれと比較してその目的が修正されているから、調質焼鈍方案それ自体も当然修正されるべきである。すなわ

第 3 表 調質焼鈍の修正による超音波透過性の変化



ち真空造塊以前の調質焼鈍では水素除去が最大の眼目であり、処理途中における水素濃度も比較的高いから水素の挙動に気を使いながら調質を行わなければならなかつたのに対し、以後の調質焼鈍では水素への配慮という負担が少なく、ほとんど調質効果のみに気を配って調質を行うことができるようになった。したがって調質焼鈍方案は修正され、水素除去処理の省略により短縮された熱処理時間で鍛鋼品の組織を可成り微細化し、超音波の透過性を改善し、調質焼鈍後における早期判定の信頼性をいちじるしく改善し、爾後の最終熱処理の負担を軽くした。第3表は調質焼鈍法の修正過程における超音波の透過性の推移を示すものである。製品A, B, Cは同一型の Ni-Mo-V 鋼鍛鋼品であり、それぞれ旧調質焼鈍、過渡期の調質焼鈍および新調質焼鈍を受けたものである。超音波試験を行った箇所は大径部の両端付近および中央部であり、その直径は約 1,400mm である。表より超音波の周波数 1.5MC の場合には、A, B, C の順に超音波の透過性がよくなり、A の場合には第1次の底面波がわずかに認められる程度であるが、C の場合には第2次の底面波も飽和波高に近いことが判る。また 3.0 MC の場合には A では激しいシャワー波が現われ、底面波の出現を疎止しているが、B ではシャワー波状態がやや改善され、第1次の底面波も認められ、C ではシャワー波がほとんど消失し、十分な高さの第1次の底面波が現われ、場所によつては第2次の底面波も認められる。なお上述のシャワー波は一般に主波近傍で激しく現われ、主波より離れるにしたがつて次第に減衰するが、このシャワー波は鍛鋼品の組織が粗大な場合ことにペー

イトの羽根状排列が顕著な場合に生じやすく、超音波のこれらの組織によつて散乱された結果がシャワー波となつて現われるものと考えられる。したがって散乱されやすい短波長の超音波ほどシャワー波を出しやすい。なお鋼中の V 含有量が高いほど鍛錬後の粗大なペーナイト組織が頑固に残留し、調質焼鈍によつてこれを微細化することが困難となり、超音波透過性も改善され難いことを附言しておく。

(b) 最終熱処理 大型

鍛鋼品は質量効果が大きいために全体的に冷却速度が低下して熱処理効果が弱くなるばかりでなく、外層部と中心部との冷却速度の差が大きくなるために熱処理効果が不均一になる。したがって大型鍛鋼品に水冷のような強烈な熱処理を施すと、表層はもちろん極端な硬化は受けないがある程度硬化し、内部までは急冷効果がおよばないから機械的性質が不均一になる。

米国においては火力発電用軸類に液冷処理を施すことが禁じられているが、この規定はかつて液冷された軸が稼働中に急冷のために拡大したものと推定される欠陥を起点として破壊を起したことが動機となつて制定されたものといわれている。しかしかような欠陥に関する限り現在は超音波試験による確認が可能であるし、また欧州で液冷処理が盛んに行われている事実を思い合わせれば、あまり問題はないものと考えられる。実際上はむしろ液冷処理によつて生ずる不均一性と残留応力が問題になるのである。この問題を検討するためにまず特殊鋼の変態特性について考察することとする。

特殊鋼の変態特性を概括的に把握するためには、その連続冷却変態曲線を吟味すればよい。一般に鋼中の Ni 含有量が増加すると、連続冷却変態曲線図においてはペーナイトノーズが張出し、また時間軸に対してペーナイト変態域が長く尾を引くようになる。このことは特殊鋼がその Ni 含有量に対して熱処理の際につきのような傾向を示すことを意味する。すなわち特殊鋼の Ni 含有量が低い場合には、急冷すると単一なマルテンサイト変態が起り、硬化能が比較的大きいが、冷却速度が下るとペーライト変態が起りやすく、ペーナイト変態域が狭いの

で、ある限界冷却速度を境として急激に硬化能が低下するのに対し、Ni含有量が高い場合には、急冷してもマルテンサイトおよびベーナイトの複合変態が起りやすく、冷却速度を下げてもベーナイト変態が持続し、硬化能の急変が見られないのである。したがってNi含有量が高い場合には冷却速度を下げてもある程度の硬化能が保持され、しかも冷却速度が変化しても硬化能の変化は比較的少ないのである。従来より米国では上記の高級な軸類に対しては比較的高Niの化学成分が採用され、他方欧州では低Niないしは無Niの成分が重用されていた。真空造塊法以前の製鋼技術の水準では、後者の場合の方が健全な製品を容易にしかも低原価で製造し得る利点があつたが、調質性が劣るために必然的に液冷処理を施さざるを得なかつたのである。しかし真空造塊法が発達し、製品が大型化するにしたがつて欧州でも次第に米国流の化学成分が採用されるようになってきた。この理由は大型化による質量効果の増大が低Ni鋼の調質性の不足を顕著にし、これを急冷処理によつて補うことが不可能となり、真空造塊法が発達が高Ni鋼の製造を容易にしたからである。低Niの場合には大型品を液冷すれば上述の理由により表層部のみある程度硬化し、内部はパーライト変態を行うために内外部に比較的顕著な組織の差したがつてまた比較的大きな硬度の差を生じ、鍛鋼品の性質の均質性を保証することが困難になる。他方米国流にNi含有量が高い場合にも、液冷すれば内部の調質効果の確保は比較的容易であるが、程度の差こそあれ内外部に硬度の差を生じて均質性が損われ、剩れ大きな熱処理応力が残留することになる。よつて所要の調質効果が確保される限り、液冷のような急冷処理はこれをさけるのが合理的である。しかしこれら軸類の性能に対する諸要求が大型化と平行してますます酷しくなりつつあることは前述の通りであるが、さらに特殊な要求が追加され、しかもこれらは互いに矛盾する場合が多いのである。つまり大型鍛鋼品の熱処理に対しては、急冷は許されないという窮屈な条件のもとに錯綜した諸要求を同時に満足することが要請されるから、熱処理条件に対しては極端に狭い許容誤差範囲しか許されず、熱処理方案の設定が困難となり、これを実施するに当つては高度の制御技術と厳格な作業管理が必要となる。最近の熱処理炉の設計および自動制御装置の目覚しい発達は正にこれに呼応するものであり、その1例として大型の縦形電気炉の完成を挙げることができる。

つぎに大型鍛鋼品の実際の熱処理作業について述べることにする。大型鍛鋼品は荒削後熱処理炉で均熱されて

から焼入処理を受けるが、この場合の冷却方法は上述の理由により空冷を原則とする。かように制約された条件のもとに少しでも調質効果を向上させようとする場合には、衝風冷却または衝風中に霧状の水滴を混入する噴霧冷却を行う。この際鍛鋼品が回転体の場合には回転しながら冷却し、冷却効果の対称性に関して考慮が払われる。この焼入処理について常温まで冷却することなく焼戻温度に再加熱されて焼戻処理が行われ、とくに入念を期するために必要あらばさらに焼入温度に再加熱して焼入および焼戻を繰返す二重熱処理、場合によつては三重熱処理を行うこともある。この焼戻処理はいうまでもなく鍛鋼品に所要の強度と靱性とを附与することを目的とするが、さらに焼入処理によつて生じた応力を除去するための重要な処理であることを忘れてはならない。若しこの応力除去が不完全なために残留応力が大きかつたり、またそれが非対称であつたりすれば、鍛鋼品の信頼性が損われ、また後述する熱変形の原因が潜在することになる。高温強度が高い特殊鋼では焼戻処理による応力除去が不完全となりやすく、ことに液冷処理などにより大きな応力が残略すれば、その安全処理はますます困難となる。液冷処理をさける理由はここにもあるのである。また上記軸類のような高級鍛鋼品の場合には調質後ほとんど納入状態まで機械加工してから応力除去処理が行われる。この処理温度は、調質状態の機械的性質に影響を与えないことを懸念して、焼戻温度より50°C程度低くするのが普通である。

4. 検査および規格

使用条件への適合性と品位とに対する総合的な判定により、個々の製品の有用性を確認するとともに、爾後の生産における製造技術改善の指針を与えるために検査が行われる。規格はかような検査に基準を与えるものである。大型鍛鋼品はきわめて複雑な性格を具えているから、限られた検査により誤りなくしかも迅速に鍛鋼品の全体像を把握することは最高級の技術であるといつても過言ではない。大型鍛鋼品の検査を誤れば、危険な製品が使用されて大事故を引起したり、あるいはまた有用な製品が廃却されて貴重な国家的資源が徒らに浪費される結果となり、さらに誤つた検査結果は検査をして製造技術改善のための導標たる資格を喪失せしめるのである。かような検査技術の向上を計るためには、必要にして十分なる検査項目の選定に留意し、検査方法の改善および規格の合理化に努力し、検査員は個々の検査結果のみに執着することなく、これらを総合して製品の全体像を誤りなく描写する能力を涵養するよう全力を傾注すべきで

ある。検査方法の分野における偉大な業績として超音波試験法の確立を挙げることができる。また規格は設計の基礎を与える意味もあるが、多くの場合製品の正常性を保証する意味が濃い。したがって多くの場合規格は使用条件に対しては絶対的のものではなく、製造技術の水準によつて変化する。この意味において検査における総合的判断の重要性が強調されるのである¹⁰⁾。

以下二、三の検査方法および規格について説明し、著者の見解を附言することとする。

(a) 超音波試験 超音波試験法は真空造塊法とともに大型鍛鋼品の製造技術に革命をもたらしたものである。何となれば超音波試験によつて大型鍛鋼品の満足すべき絶対条件である健全性を正確に判定することが可能となり、またこの試験の非破壊的性格のために従来の方法に比較して比べようもなく低廉、豊富かつ迅速に製造技術の指針を蒐集することができるようになったからである。また超音波試験においては欠陥検査のみでなく、たとえば超音波の透過性により調質状態も知ることができるから、超音波試験法は検査の目的として最も重要な製品の全体像の把握に最適な方法であり、しかも前述のように健全性の早期判定の手段を提供して工期確保の有力な手段ともなり、検査部面における最大の武器として活用されている。現在超音波試験による鍛鋼品の欠陥判定法につき日本鍛鋼会技術委員会 P A F 委員会において各種の検討が行われているが、その成果に期待する処が多い。

(b) 機械的試験 大型鍛鋼品とくに高級な鍛鋼品の機械的試験は非常に苛酷なものであるが、まず第一にその試験種類の数および試験片数が多くしかも逐次増加の傾向にある。第4表は発電機軸に対して規定された試験種類および試験片数の1例である。この中で引張試験では引張強さおよび降伏点はその最低値が抑えられるばかりでなく、相対応ずる試験につきそのバラツキに対して 4.2 kg/mm^2 の制限が附されており、また伸びおよび絞りに対しても実数値でバラツキの限界はそれぞれ4%および8%となつている。これは酷しい使用条件に晒さ

れる大型発電機軸の安全性を保証するためにとくにその均質性が重視された結果とはいえ、本質的に均質を確保することの困難な大型鍛鋼品に対してこの規格は苛酷に過ぎるものといわざるを得ない。この均質性に対する規格は飽くまでも正常性の保証を意味するものであるから、その運用は弾力性のあるものとすべきであろう。

また数年前米国において大型発電機軸およびタービン軸に事故が続出し、その1因が材料の切欠感受性にあるものと認定されて以来機械的試験に衝撃試験による破面性状試験(略称 F A T T 試験)が追加されるようになった。この試験結果は V ノッチシャルピー試験によつて得られた試験片の破面の脆性破面率に対する遷移温度の測定値によつて評価される。この試験を厳格に施行するためには12個の試験片を要する。最近 E. T. WESSEL は試験片に尖鋭な人工疵を作り、破断強さの遷移温度を測定し、これが F A T T 試験による遷移温度と相関々係のあることを明らかにした¹¹⁾。これによつて F A T T 試験に直観的に理解しやすい基礎的な意義を与えた。しかし F A T T 試験の結果を設計の基礎数値として採用するほど設計技術は進歩していないし、それだけにまた規格には相当な安全率が見込まれているから、この規格も正常性保証の意味が濃い。かような規格の運用について著者の見解を述べればつぎの通りである。

すなわち前述の事故を起した多くの軸の調査結果によれば、危険と判断される遷移温度は現在規定されている規格値(たとえば 80°C 、 120°C など)よりも遙かに高温である。他方鋼の遷移温度は一般的に引張強さ(あるいは硬度)が高いほど高くなることが知られている。したがって各種の製品それぞれについて引張強さと遷移温度との関係を求め、これに品質管理的な考察を加えて、正常性を保証すべきいわば正常関係を導出することができる筈である。今ある製品が硬目に調質されたものとする。しかしてその遷移温度が規格温度よりも幾分高いが危険な温度よりも遙かに低いものとする。この製品が正常な健全性を具えており、しかも引張強さと遷移温度が正常関係を満足すれば、そのまま製品の有用性を認めてもよいのではないかと考えられる。ただしこの場合戒心すべきことは、規格の elastic な運用はややもすれば loose な運用に転化しやすいことである。

高圧タービン軸の場合には上記の各種の機械的試験のほか切欠のクリープ破断試験が追加されるようになったが、その試験方法および規格には未だ合理化すべき点が多々あるものと考えられる。

(c) そのほかの試験 機械的試験のほか冶金学的

第4表 発電機軸の機械的試験の試験片の数

試験の種類		試験片数
引 張		18
衝 撃	破 面 率	4
	アイゾット	6
	シャルピー	6
計		34

な試験として硫黄写真，結晶粒度，結晶組織，清浄度など各種の試験が行われ，鍛鋼品の全体像把握のための資料が蒐集される。超音波試験は前述のように全体把握のための最適な試験であるが疵見試験としても有力な試験がある。疵見試験としては肉眼試験，ダイチェックおよび磁気探傷試験などがこれを補つて重複適用される。

さらに火力発電用軸類には特徴的な試験として熱変形試験が適用される。熱変形試験は鍛鋼品の温度に対する変形特性を調査する試験である。すなわち納入状態まで機械加工された製品を加熱炉の中で緩やかに回転しながら規定温度まで加熱し，定常状態に達してからその撓みを測定し，常温まで冷却して再び撓みを測定し，両者の差が $2.5/100\text{mm}$ 以内に収まることが合格条件とされている。使用者によつては上述のような定常状態における変形のみならず，加熱および冷却の途中の変形の差をも問題にすることがある。かような変形を熱変形と呼ぶこととするが，熱変形は鍛鋼品の性質の不均一性とくに中心線に対する非対称性に帰因するものである。この非対称的な不均一性の中には熱変形試験のための加熱によつて変化（多くの場合軽減する）するものと変化し難いものがある。とくに後者は鍛鋼品の製造上ならびに使用上困難な問題を提供するのである。これらの原因の詳細については未だ十分な検討は行われていないが，著者の臆測を加えて原因と熱変形の特性ととの関係を対比することとする。

まず熱変形試験によつて変化しない熱変形の原因は熱膨張係数の非対称的な不均一性にあるものと考えられる。この不均一性の起る1因として組織の不均一性が考えられる。第4表は著者が各種の鋼についてパーライト組織とベーナイト組織との 500°C までの平均熱膨張係数の差を求めた結果である。この中でとくに重要な鋼種は Ni-Mo-V 鋼であるが，これは調質性が良好であるから実際には組織にこのような大きな差が現われるとは思われない。著者はこの組織の不均一性による熱膨張係数の不均一性の熱変形量におよぼす影響を半定量的に評価するために模型的に平板を考え，Ni-Mo-V 鋼の特性を考慮し熱膨張係数の差の最大を第5表の数値の約2分の1すなわち 0.6% として熱変形量を計算した¹³⁾ その詳細については省略し結論のみを述べれば， $2,000\text{mm}$ の支点距離に対して 500°C で $15.6/100\text{mm}$ の撓みを生ずることとなる。

つぎに変化性の熱変形について述べれば，その原因としては試験のための加熱によつて除去される非対称的な残留応力の分布および製品表面の不均一な加工歪を受けた薄層とが考えられる。前者の場合には加熱とともに応

第5表 鋼の組織と熱膨張係数

鋼種	熱膨張係数 (500°C)		$(\alpha_2 - \alpha_1)/\alpha_2$ %
	パーライト α_1	ベーナイト α_2	
Mo 鋼	13.53×10^{-6}	13.61×10^{-6}	0.66
Cr-Mo 鋼	13.06×10^{-6}	13.35×10^{-6}	2.17
Ni-Mo-V 鋼	13.24×10^{-6}	13.41×10^{-6}	1.27

力が除去されて変形が起り，応力が完全に除去されればその変形は永久変形となり，爾後は変形は現われなくなる。また後者の場合には加熱とともに急激な変形が現われるが，ある温度に達すると臨界的に旧に復し，爾後は変形を生じない。

終りに鍛鋼品の内外部に温度差がある時のみ現われる一時的熱変形について述べる。この原因としては熱伝導度の非対称的な不均一性，表面の不均一な輻射率，試験のための加熱では除去不能な残留応力などが挙げられる。とくに後者について熱膨張係数の場合になつて半定量的な計算を行つた¹³⁾。非対称的に分布する残留応力の最大値を 3kg/mm^2 ，内外部の最大温度差 150°C をとして $2,000\text{mm}$ の支点距離に対して $26.3/100\text{mm}$ の撓みが算出された。参考までに残留応力のために熱変形を生ずる定性的な説明を行う。すなわち常温で残留応力存在のもとに真直ぐな鍛鋼品の内外部に対称的な温度差が生ずれば，各部分のヤング率 E は温度によつて変化するから，応力の平衡が破れて変形を生じ，温度が均一になれば E の差がなくなるから再び真ぐになるのである。M. H. ROBERTS など¹⁴⁾によれば Ni-Mo 鋼の E の温度特性は次式によつて表わされる。すなわち T を 100°C を単位とした温度値とすれば

$$E \times 10^{-3} (\text{kg/mm}^2) = 20.86 - 0.516T - 0.0438T^2$$

以上のように熱変形試験は一方においては鍛鋼品の非対称的な不均一性の検定に役立ち，他方において鍛鋼品が使用される場合に熱変形によつて生ずべき振動に対する保証を与えることになる。

IV. 結 言

以上述べてきた処を要約して結言すればつぎの通りである。すなわち大型鍛鋼業の生長率は世界的水準においても決して高くはない。この原因は大型鍛鋼品に特徴的な不利な需要特性と生産条件とにあり，大型鍛鋼品の製造に必要な高度の技術には報いられる処が極めて少ないのである。わが国の大型鍛鋼業発達の歴史的背景はこの不利を一層はなはだしいものにしていく。わが国の工業が全般的に高い生長率で伸長せんとする現在，工業全体の原動力である重工業の発展に必要なこの企業が

一般水準に比して立遅れの状態にあることは国家経済上由々しき問題である。わが国の工業が自由経済を基調とする限り、ある程度の弱肉強食の状態が見られることは致方ないが、工業が全体として強靱な体質を培いつつ生長するためには、成行に委せて各種企業間に大きな格差を生ずるようなことはさけるべきであろう。この意味において大型鍛鋼業の直面する矛盾は公平な客観的見地からある程度調整されるべきであろう。しかし現状においてかような措置の実現を望むことは不可能であろう。したがって大型鍛鋼業は独力による現状打開に邁進せざるを得ない。

残された道は技術的条件の改善を措いて他になく、原価低減、品質改善、廃却防止などに全力を傾注して、企業の負う社会的責任に応えなければならない。前述の真空造塊法を中心とする製造技術の発達はこの方向への力強い前進を意味するものである。しかし超音波試験を中心とする検査方法の進歩と使用者の材料に対する要求の苛酷化とは、かような製造技術の進歩の近随をも許さない勢にあるのである。けだし検査の目的は製品の使用条件への適合性を吟味すると同時に製品の正常性を判定することであり、この正常性の基準は製造技術の水準におかれるべきであるが、検査方法の目覚しい進歩に目を奪われ製造技術の水準を無視して、むしろ検査能力に基準が

おかれ、製品の使用条件への適合性の基準よりも遙かに高くなりつつあるのである。製品の正常性に対する高い基準は製造技術の進歩に不可欠のものであるが、企業の限界を越えてあまりにも高くすることは工業の健全な発達にとり喜ぶべきことではない。この意味において検査基準の合理的設定が望まれる次第である。

(昭和36年5月寄稿)

文 献

- 1) Iron & Coal Trades Rev., 174 (1957), 338
- 2) 鉄と鋼, 41 (1955), 854; 1050; 1172; 1233; 42 (1956), 14; 89; 301; 387; 43 (1957), 432; 529
- 3) 鉄と鋼, 41 (1955), 1233
- 4) 鉄と鋼, 43 (1957), 529
- 5) Stahl u. Eisen, 60 (1940), 833
- 6) Steel Process., 42 (1956), 13
- 7) 日本金属学会誌, 20 (1956), A-221
- 8) H. GUMMERT: Stahl u. Eisen, 80 (1960), 1517
- 9) J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 188 (1958), 209
- 10) R. SINN: Stahl u. Eisen, 77 (1957), 1674
- 11) Trans. Amer. Soc. Metals, 52 (1960), 277
- 12) 三菱製鋼技術雑報, No. 110 (1958) (非公刊)
- 13) 三菱製鋼技術雑報, No. 108 (1957) (非公刊)
- 14) J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 157 (1947), 345