

超大形鋳鋼製厚板補強ロールの製造

Manufacture of Ultra-large Cast Steel Back-up Rolls for Plate Mill

蜂 須 幹 雄*
Mikio Hachisu

安 斎 栄太郎*
Eitarô Anzai

黒 沢 忠 男*
Tadao Kurosawa

益 子 厚 美*
Atsumi Masuko

根 本 正**
Tadashi Nemoto

要 旨

昭和42年来日本鋼管株式会社福山, 八幡製鉄株式会社君津, 神戸製鋼所加古川各製鉄所に仕上がり重量 130 t を越える世界最大級の鋳鋼製厚板用補強ロールを製造し納入した。これら超大形のロールを製造するにあたり,

- (1) 鋳造時内部欠陥のないロールを得るため成分および冷却条件を電子計算機 HITAC 5020 を用いて解析し, 多年にわたる経験に科学的解析の上積みを行なった。
- (2) 下部ジャーナルおよび胴部鋳型には鋳鋼製金型を用い, かつ衝風冷却を行なって方向性凝固を促進した。凝固後は鋳造応力軽減のため胴部金型外周をアスベスト布でおおい徐冷を行なった。
- (3) 熱処理条件については鋳造応力と熱処理中の熱応力によってロールが割れないよう, 前記電子計算機を用いて解析するとともに, 最終的には残留応力が少なく均質な性状と高い材料強さを得るような加熱冷却条件を決定した。
- (4) 熱処理作業にはプログラムコントロールされた抵抗式電気炉を用い, 胴部および軸部に埋め込んだ特殊熱電対による温度を基準として, 多段熱処理法により均一加熱を行なった。さらに特殊冷却装置を用いて焼準時における各部冷却速度の均一化と高温度焼戻により残留応力の軽減と組織, かたさの安定化を図った。
- (5) 旋盤作業は強力大形ロール旋盤を用いて行なったが, ロール重量がきわめて大きいためチャック作業が困難で特殊なローラ振れ止めを製作しこれを使用して高精度に加工した。
- (6) 研削作業では加工精度の良否をきめるレスト部基準面精度を検討する必要があった。その真円度修正研削には研削中の振れ量を十分注意して観察するとともに, と石のドレッシングと切込み量に注意しこの基準面の精度を数 μ 以内にした。この基準面をレストすることにより高精度に加工できた。なおロールをスムーズに起動させるためレスト部には高粘着性の特殊潤滑油を強制給油した。

1. 緒 言

昭和 35 年輸入ロールの補充として仕上がり重量 75 t 厚板補強ロールの国産第 1 号を製造以来 95 t, 104 t と大形化し, ついに最近の圧延設備拡充においては 130 t を越えるロールの出現をみるに至った。おもな仕様は表 1 のとおりである。

ことに今回製造することとなった一連のロール (B, C, D) は胴径, 胴長, 全長ともに著しく大きくなったので, 鋳造, 熱処理, 機械加工各工程において設備を充実して製造態勢を整えねばならないが, 重要なことはこれら質量の大きいロールをいかに健全に鋳造するか, 過酷な圧延条件でも良い成績を示すためにどう熱処理するか, また高い寸法精度に機械仕上げするにはどうしたらよいかなど製造技術の研究がいっそう必要となる。

ロール成分は圧延中に生じやすいスポーリングと摩耗に強いロールが得られることおよび製造時における鋳造性, 熱処理性を勘案して表 2 のように決定された。

本報告は世界最大の鋳鋼製厚板用補強ロールを製造するにあたり, 電子計算機 HITAC 5020 を用いて鋳造および熱処理方案決定に資し, それを基に鋳造, 熱処理を行なった作業方法ならびに機械加工方法について述べる。

2. 鋳 造

2.1 基礎的考察

ロールの使用条件から鋳物の成分範囲や形状についての仕様が規

* 日立製作所勝田工場

** 日立製作所日立研究所 工学博士

表 1 ロールの仕様

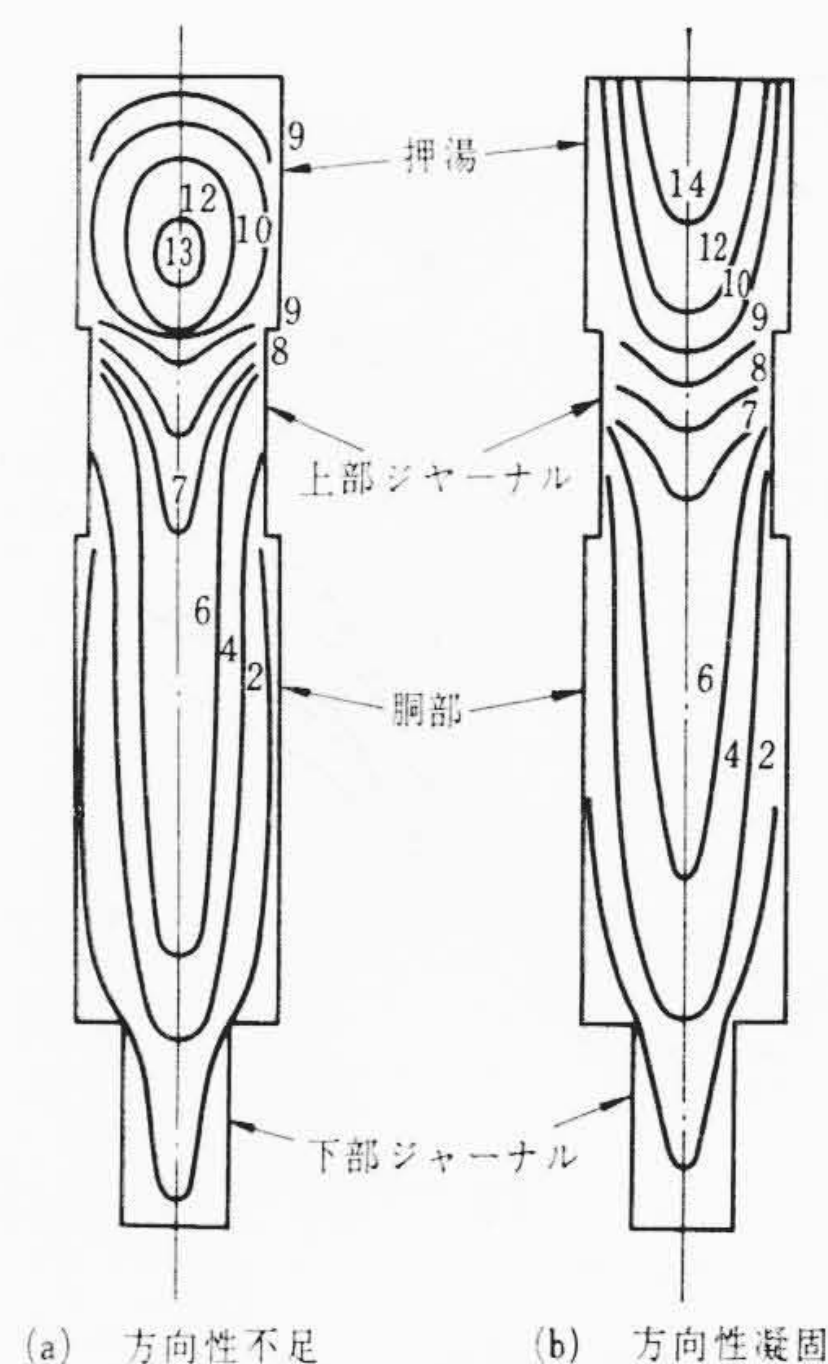
納 先	胴 径 (mm)	胴 長 (mm)	全 長 (mm)	か た さ Hs	
				胴 部	頸 部
A	1,800	4,300	7,620	45±3	40±5
B	1,980	4,600	8,200	47±4	40±4
C	2,000	4,600	8,662	45±4	40±4
D	2,000	4,600	8,662	45±4	40±4

表 2 ロールの化学成分範囲

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	V%
0.55/0.8	0.3/0.6	0.5/0.8	<0.015	<0.010	0.4/0.8	0.6/1.2	0.7	0.05/0.25

定されるが, この範囲内でできるだけ健全な鋳物が得られるように成分や鋳造方案を決定しなければならない。特に本ロールは鋳物として最大級の厚肉品で, ひけ, 割れ, 偏析, 結晶粒粗大化など多くの問題が予想された。

健全な鋳物の製造には正確な技術的知見と多年の経験の積み重ねがものをいうが, 積み重ねた経験は勘としてでなく科学として生かされなければならない。われわれは過去に製造した仕上がり重量 30 t 以上のロール約 100 本について重量, 成分など 24 の因子と健全性の関係を統計的に調査してみた。健全性を総合的に表わす変数 Q を定義し, これが各因子の 1 次式で表現されると仮定して重回帰分析を行なった。データの処理には電子計算機 HITAC 5020 を利用した。おもな因子について次の式が得られた。



曲線は固相線温度、
数字は時間(10⁴s)を示す。

図1 ロールの凝固パターンの
計算例

$$Q = \text{const.} - 0.05 \times \text{重量 (t)} - 12.17 \times \text{炭素量 (\%)} \\ - 48.26 \times \text{りん量 (\%)} - 246.41 \times \text{いおう量 (\%)}$$

これによると重量増加は品質上不利であること、りん、いおうなどの不純物は極力除くべきことが裏付けられ、さらに仕様の許す限り低炭素成分にするほうが安全であることがわかった。

このデータからまた鑄造方案上の因子の重要性が示されたので、これは基本的には凝固パターンの問題と考え、電子計算機により凝固計算を行なった。結果の一例として図1(a)は一定の方案のもとでの凝固パターン(凝固進行状況)を示したものである。胴部では凝固末期に押湯からの溶湯補給通路が狭く、かつ長くなること、押湯内の最終凝固位置が低すぎることなど、総じて凝固の方向性が不足していることがわかった。これに対し同図(b)は鑄型下部の冷却を促進する一方、押湯上面を強力に加熱した場合の計算結果を示しており、方向性凝固が実現される結果、ひけ、割れ、偏析などの低減が期待できる。

また各温度での鑄造材の強度を測定する一方、凝固時、凝固直後、冷却途中など各段階での鑄物の内部応力を計算し、割れの起こらないような適正な冷却方式を決定した。

2.2 鑄 造 作 業

溶解はエール式塩基性電気炉数基によって行なわれ、4本の湯道から注入された。大形ロールの場合には凝固時間が長く、凝固中にりん、いおうの偏析、含有ガスの凝集が鑄造時の欠陥をもたらし、ロールの品質を低下させるので、溶解材料として低りん鉄、低銅鉄および高級鋼材を使用するとともに精錬を十分に脱りん、脱硫を図った。さらに出鋼直前にアルゴンガスを溶鋼中に吹き込んで水素の除去に努めた。

図2は鑄型の構造を示したもので、胴部および下部ジャーナル鑄型には鋳鋼製金型を使用し、金型内面を耐火物で被覆した。耐火物の厚みは下より上のほうを厚くして下のほうが早く冷却するようにした。さらに下部ジャーナル鑄型には送風機を用いて衝風冷却を行ない方向性凝固の促進を図った。金型鑄造は砂型鑄造に比較して著しく冷却速度が大で、健全なロールが得られた。

上部ジャーナルおよび押湯鑄型は砂型で作り、ゆっくり凝固するようにし、胴部が固まる際に生ずる収縮窩(ひけ巣)を防止するため溶湯が補給できるようにした。

押湯は2段の湯道から注入され、高温の溶鋼が常に上方になるよ

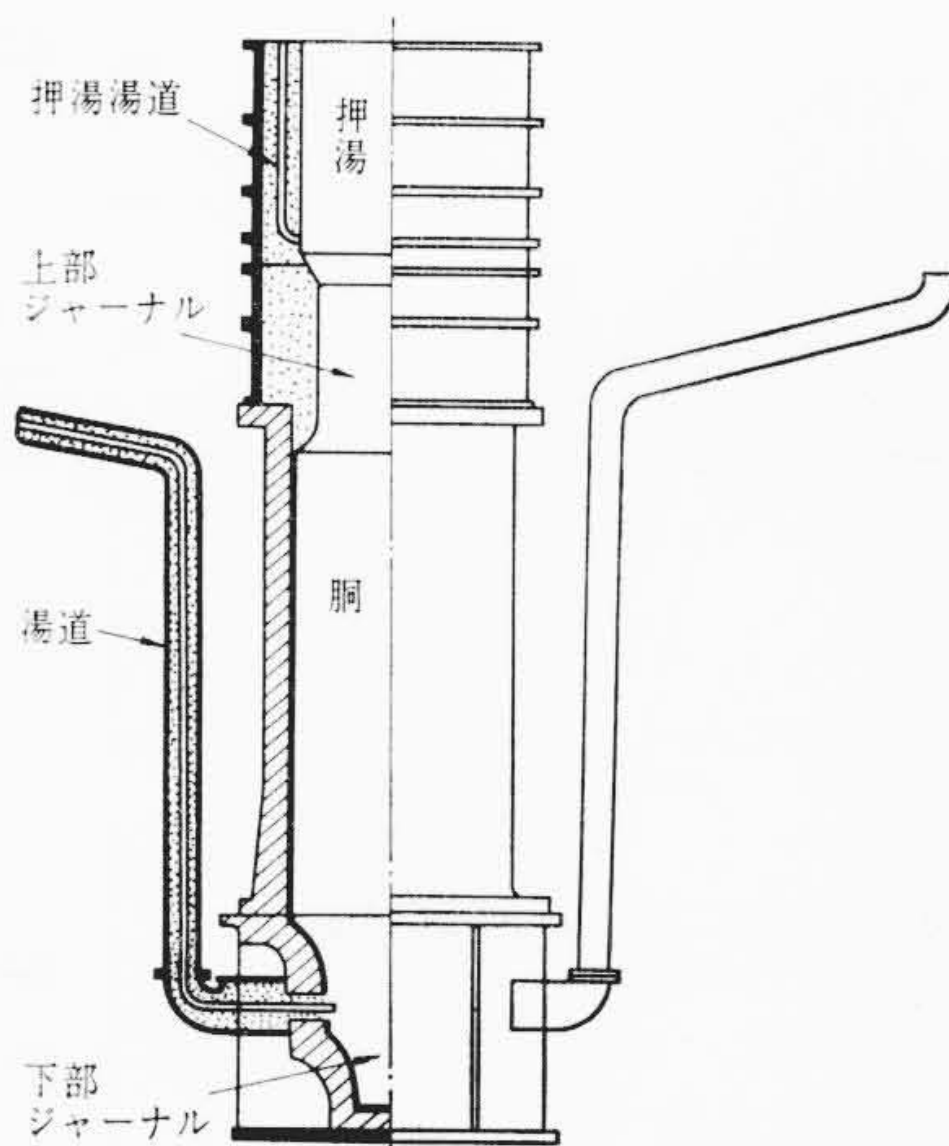


図2 鑄型の構造



図3 鑄込作業

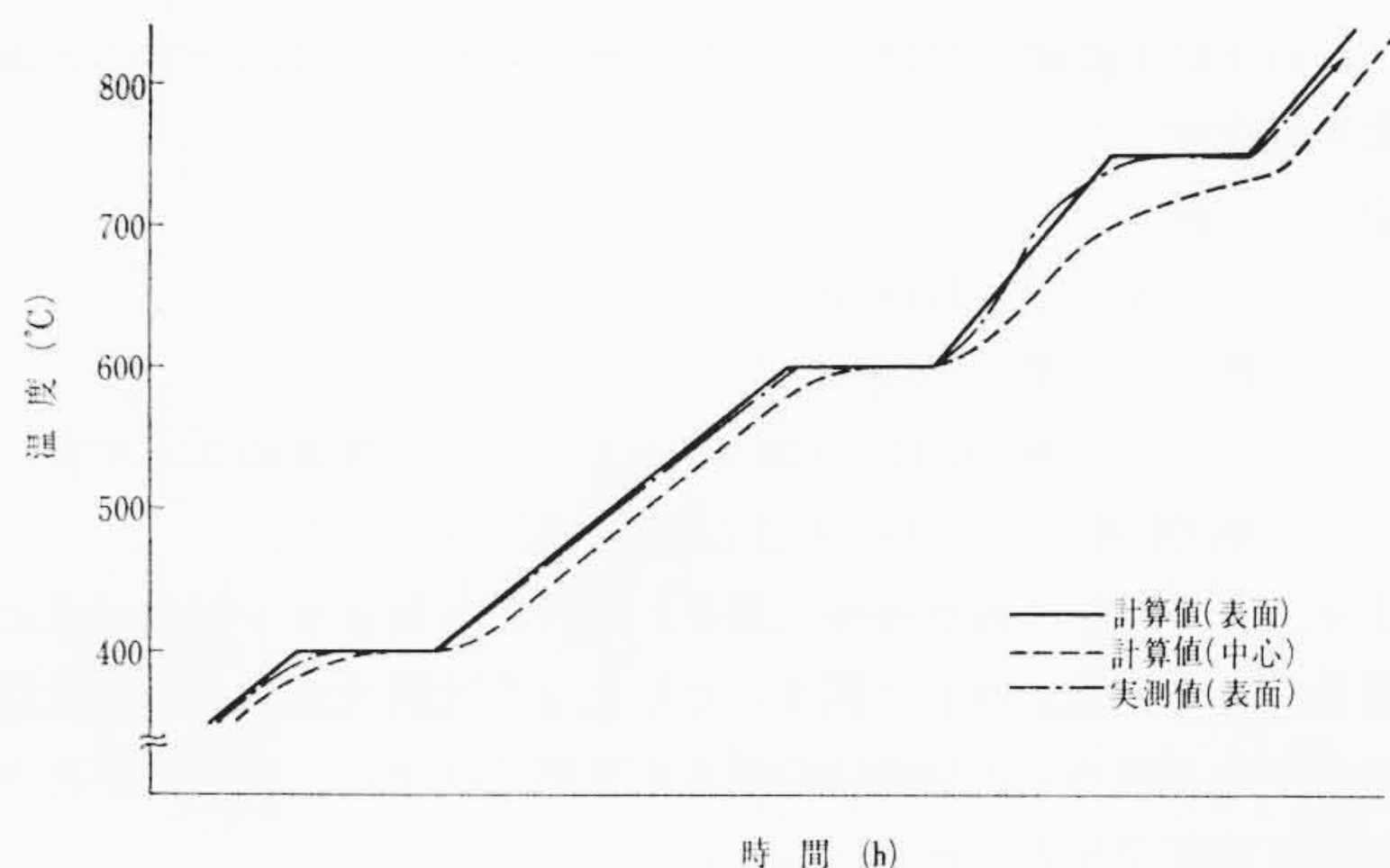


図4 低温度加熱領域における温度変化

うにしてある。図3は鑄込作業状況を示したものである。

鑄込終了後押湯上面を約500mm厚さに発熱保温材および断熱材でおおいふたをする。発熱材の反応による熱で押湯の温度を高め、反応後は厚い被覆層によって放熱を防ぎ押湯の凝固を著しく遅らせることができた。

砂型鑄造と比較して冷却速度が著しく大きいことから、常温に達したときのロール内部の鑄造応力もまた大きい。そのためわずかな欠陥をも起点として割れを生ずる危険がある。したがって凝固までは急速に冷却し、凝固後は徐冷することが望ましく、胴部金型外周をアスベスト布でおおい以後徐冷して鑄造応力の軽減を図った。

3. 熱 処 理

超大形厚板補強ロールの熱処理で特に留意すべき点は、鑄造応力を含む熱応力による割れの問題、最終的には残留応力の少ないことおよび均質な性状と高い材料強さを得るような熱サイクルの構成にあるといえる。これらの諸問題について研究結果の一部とロール製造記録について述べる。

3.1 熱 処 理 応 力

熱処理作業中に発生する主応力は加熱中のものと強制冷却中のものと二つに大別される。ここで前者の加熱中の応力は一般に鑄造応力との合成による場合で見かけの応力より高くなる。また冷却中の応力はその後の温度経過により調整されるものと考えられる。

日立製作所では熱サイクルの全工程におけるロール内外部の温度差と熱応力について詳細な検討を加えている。図4はロール加熱中の熱応力を求めるためロール内外部の温度分布を電子計算機を用いて解析した結果と実測値を示したものである。ここで計算条件は無

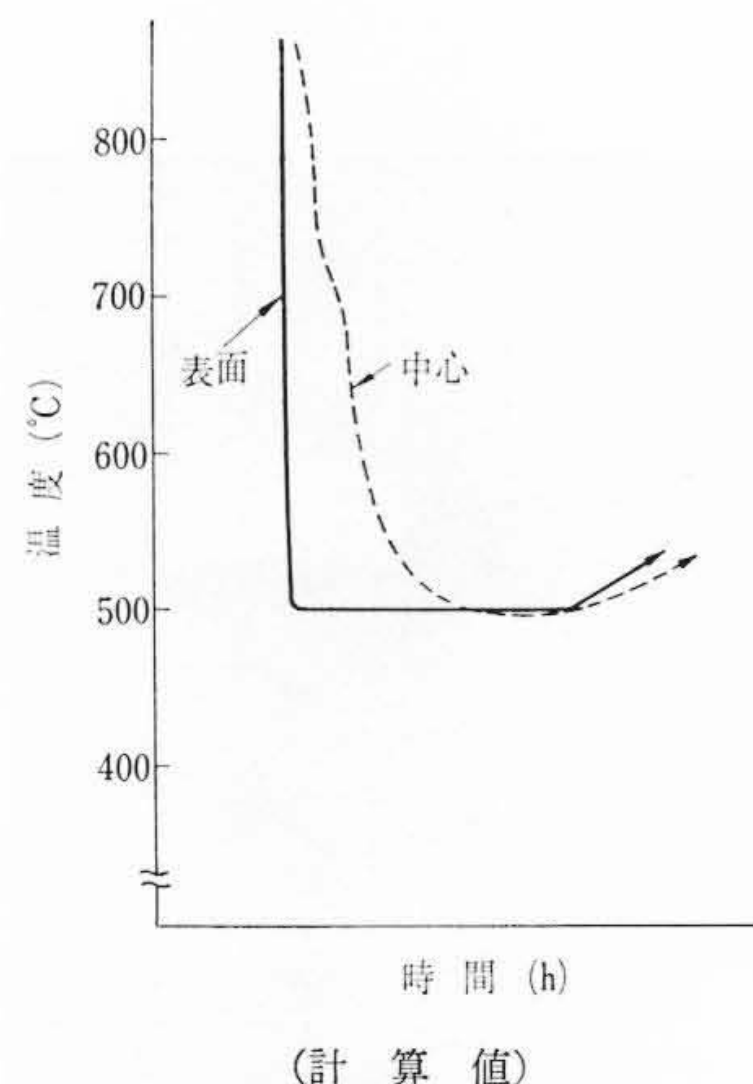


図 5 強制冷却による温度変化

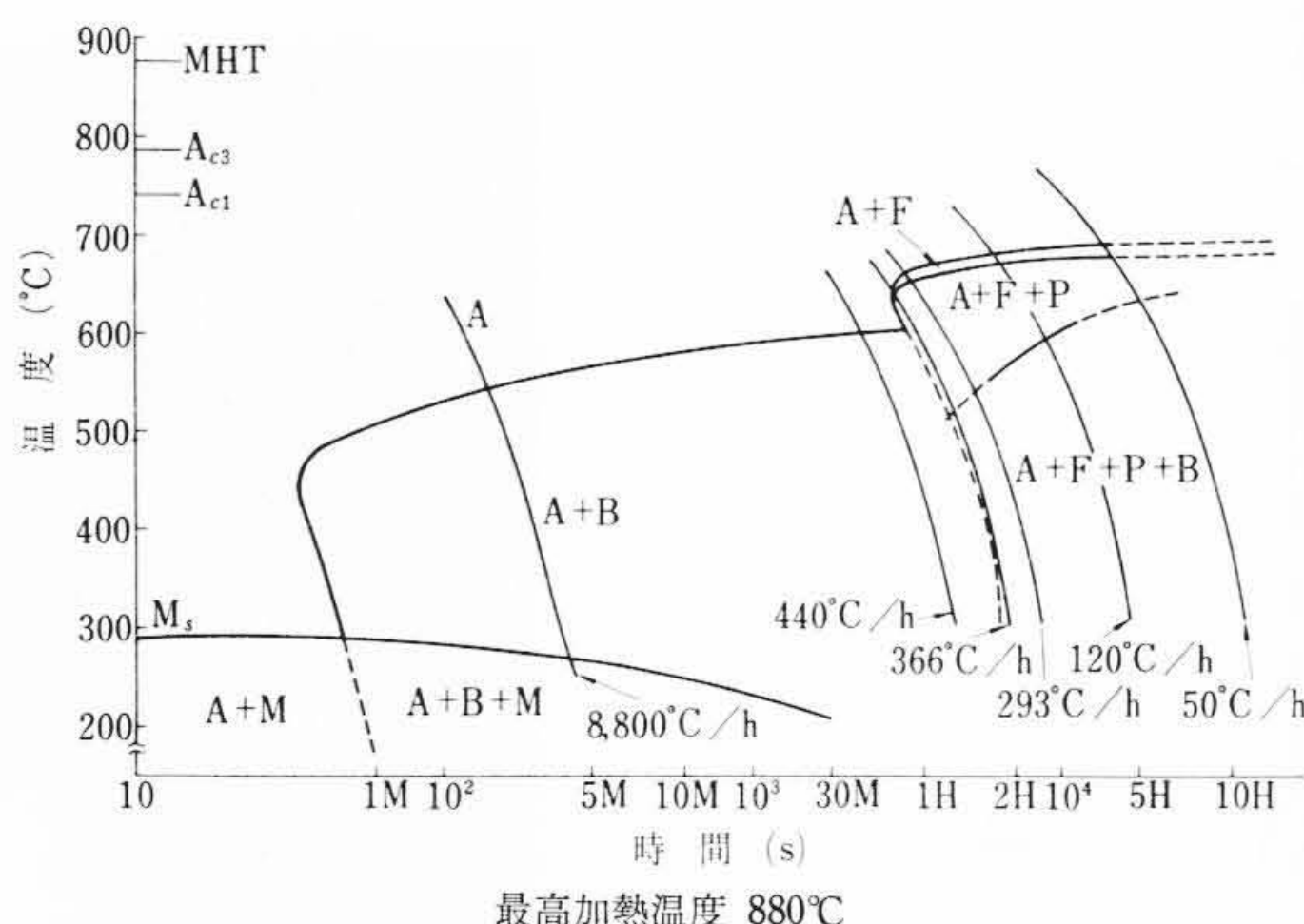


図 6 連続冷却変態曲線

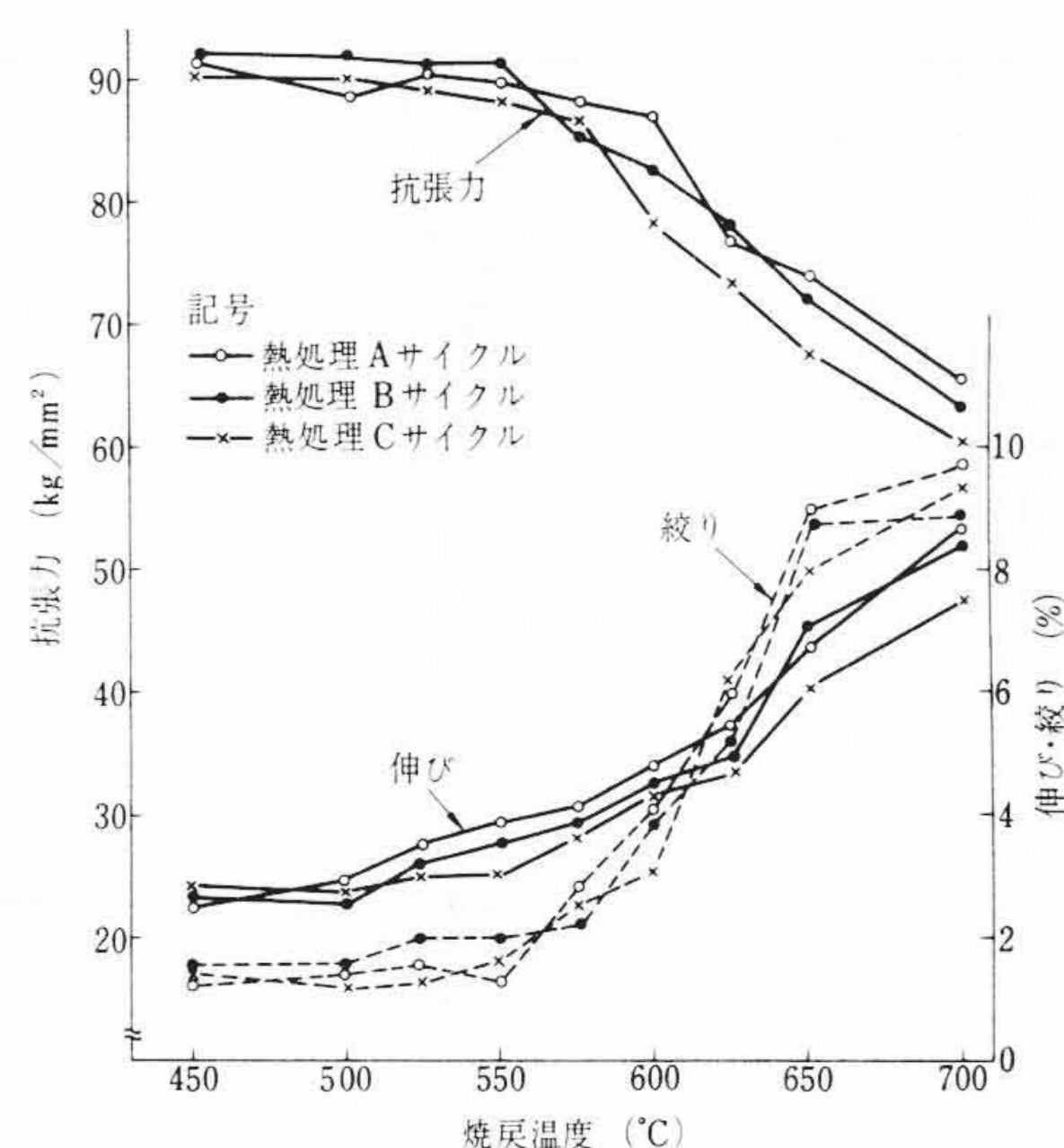


図 7 熱処理法と材料強さの関係

限円柱の半径方向の熱伝導としており、計算には差分方程式が用いられた。表面の境界条件としては任意の時点のふんい気温度を与え、その中間を直線で結びふんい気とロール表面の間に一定の伝達係数 h を仮定した。

定 数

ロール半径	1,000 mm
密 度	7.6 g/cm ³
比 熱	0.11~0.59 cal/g°C
熱 伝 導 度	0.06~0.12 cal/cms°C

温度によって変化
する。

図 5 は上記の条件で強制冷却（焼準）時の内外部温度を計算で求めた結果である。図 4 および図 5 に示したような温度差により弾性的な熱応力のみ求めると加熱時の最大引張応力は中心、軸方向にありその値は次式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{(1-\nu)}(\theta_m - \theta_c)$$

ここに、 θ_m, θ_c ： 平均温度，中心温度

E ： ヤ ン グ 率 (2×10^4 kg/mm²)

α ： 熱 膨 張 係 数 (°C)

ν ： ポ ア ソ ン 比 (0.3)

上式により $\sigma_z = 1.82$ kg/mm² となり強度に比較してほとんど問題にならない値となる。このような考え方に加えて加熱、冷却中の変態応力についても十分な検討がなされ、実体ロールの加熱、冷却条件が決定された。一方熱処理後の残留応力についても詳細な検討が加えられ応力軽減策として独自の高温焼戻が施されその目的を達成している。

3.2 熱処理および材料強度

ロール品質、顧客の要求および経済性を加味した熱処理法はきわめてむずかしい問題を含んでいる。超大形厚板補強ロールの熱処理の基本形としては 2 回に分けて行なうのが一般的である。すなわち第一段処理では鑄造組織の矯正と均質化を目的とし、第二段処理ではロール使用面へ適正なる性能を与えることが主目的とされている。一連の熱サイクルにおける個々の温度および加熱、冷却条件の決定には数多くの研究改善が重ねられている。図 6 は焼入冷却速度の決定に基礎となる適用鋼の連続冷却変態曲線(CCT)である。大質量のロールでは容易に急速冷却が得られないから、特殊元素の配合により連続冷却変態曲線の最速点を長時間側に移動させる方法が用いられる。加えてこれらの添加元素が圧延使用に際してロール性能および材料強さを向上させるものと考えられる。一方、熱処理温度の組合せあるいは冷却条件は材料強さに大きな影響を及ぼすものである。図 7 は厚板補強ロールの適用材料が最終熱処理条件によって変化する材料強さを示したもので、これらの一例でも熱処理条件い

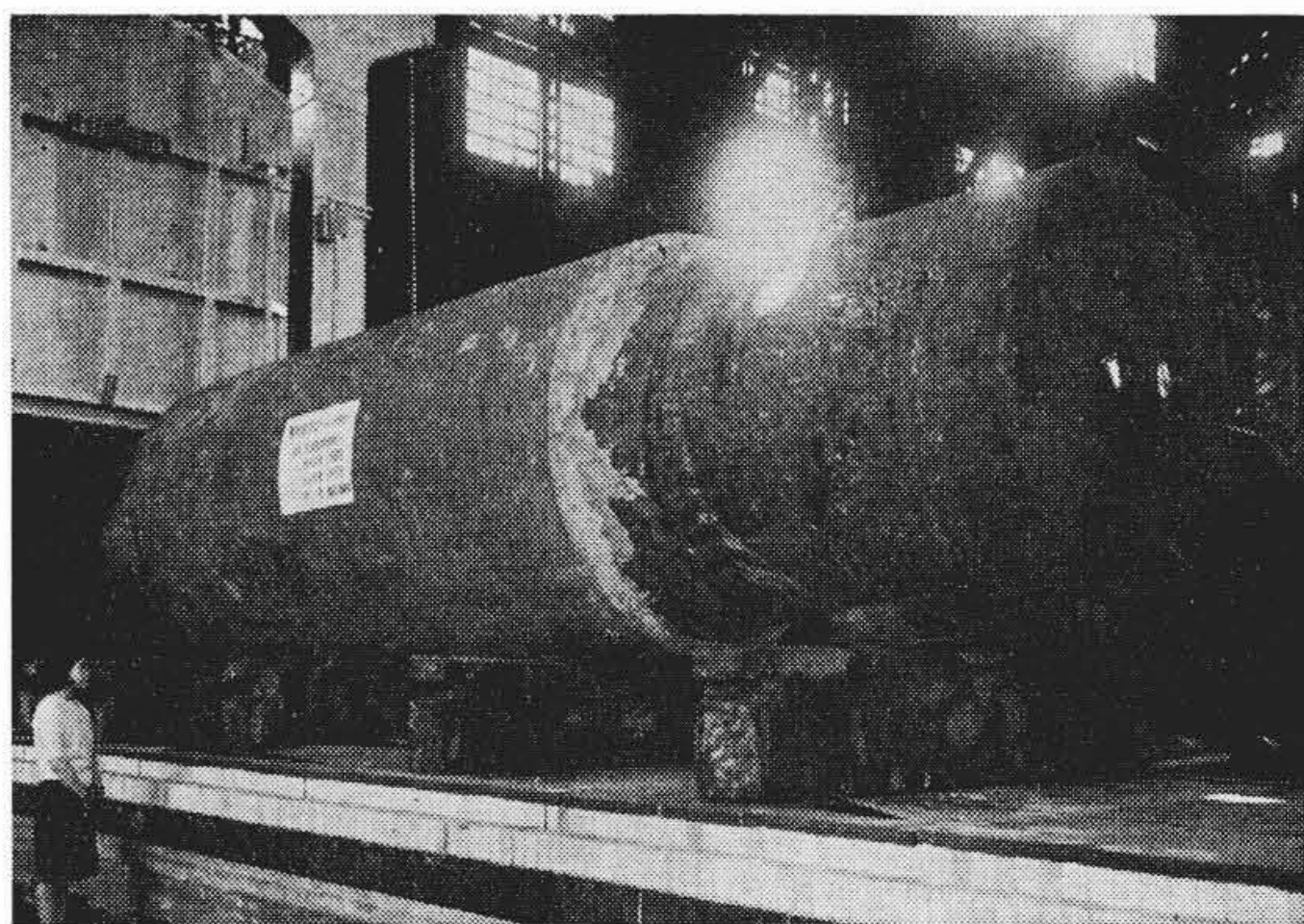


図 8 熱処理炉へ積み込んだ超大形厚板補強ロール

かんによってロール材として使用面から適した性質が得られることが判断される。

3.3 熱処理作業

超大形厚板補強ロールの熱処理はすべてプログラムコントロールされた容量 2,100 kW 抵抗式電気炉（積載重量 180 t）および容量 1,500 kW 抵抗式電気炉（積載重量 200 t）によって行なわれた。第一段処理のため炉積みされたロール外観を図 8 に示す。電気炉使用の利点は炉内温度分布のうち特に低温度範囲がすぐれており、ロール全体が低温度から均熱されることであり、熱処理の効果をいっそう向上させることができる。

操業中の温度管理はすべて本体基準として胴部および軸部に埋め込まれた特殊熱電対 12 点によって行なわれた。熱処理作業を進めるにあたっては以下の内容を十分に検討した。

- (1) 熱サイクル温度の効果的構成（多段熱処理法の採用）
- (2) 加熱速度、方法と熱応力
- (3) 変形および脱炭に対する配慮（特殊酸化防止塗料の使用）
- (4) 加熱、保持中の温度分布の均一化（各部 5°C 以内に押える）
- (5) 焼準冷却速度の各面均一化（特殊冷却装置の製作と各面の測温管理）
- (6) 高温焼戻による残留応力の軽減と組織、かたさの安定化以上の諸点を実体品の操業に適用し、残留応力の少ない高品質のロールを製造することができた。

4. 機 械 加 工

超大形厚板補強ロールの機械加工は旋盤作業と研削盤作業が主体となり、しかも重量が大きいのでチャック作業が困難のため、いず

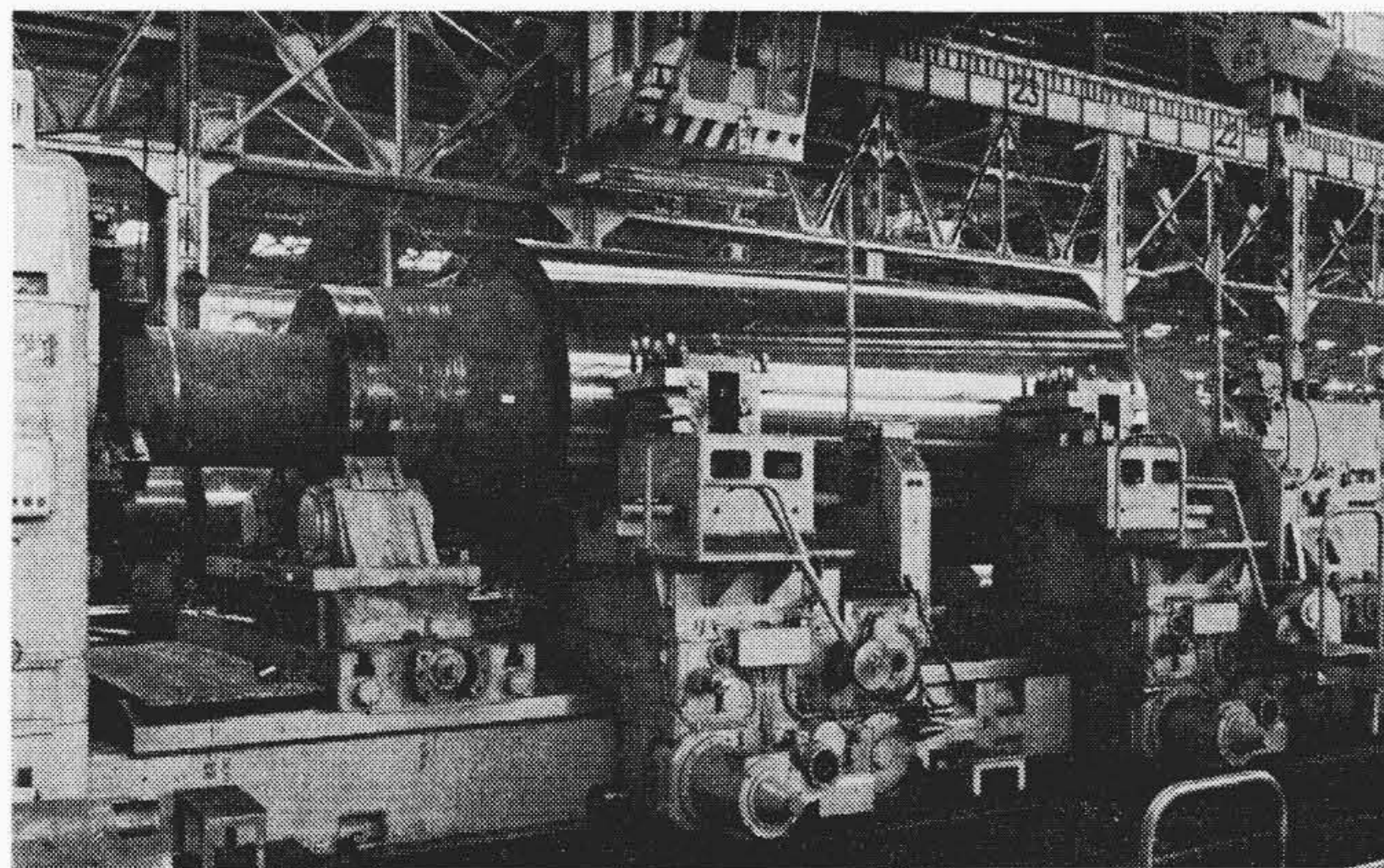


図 9 荒削り作業中

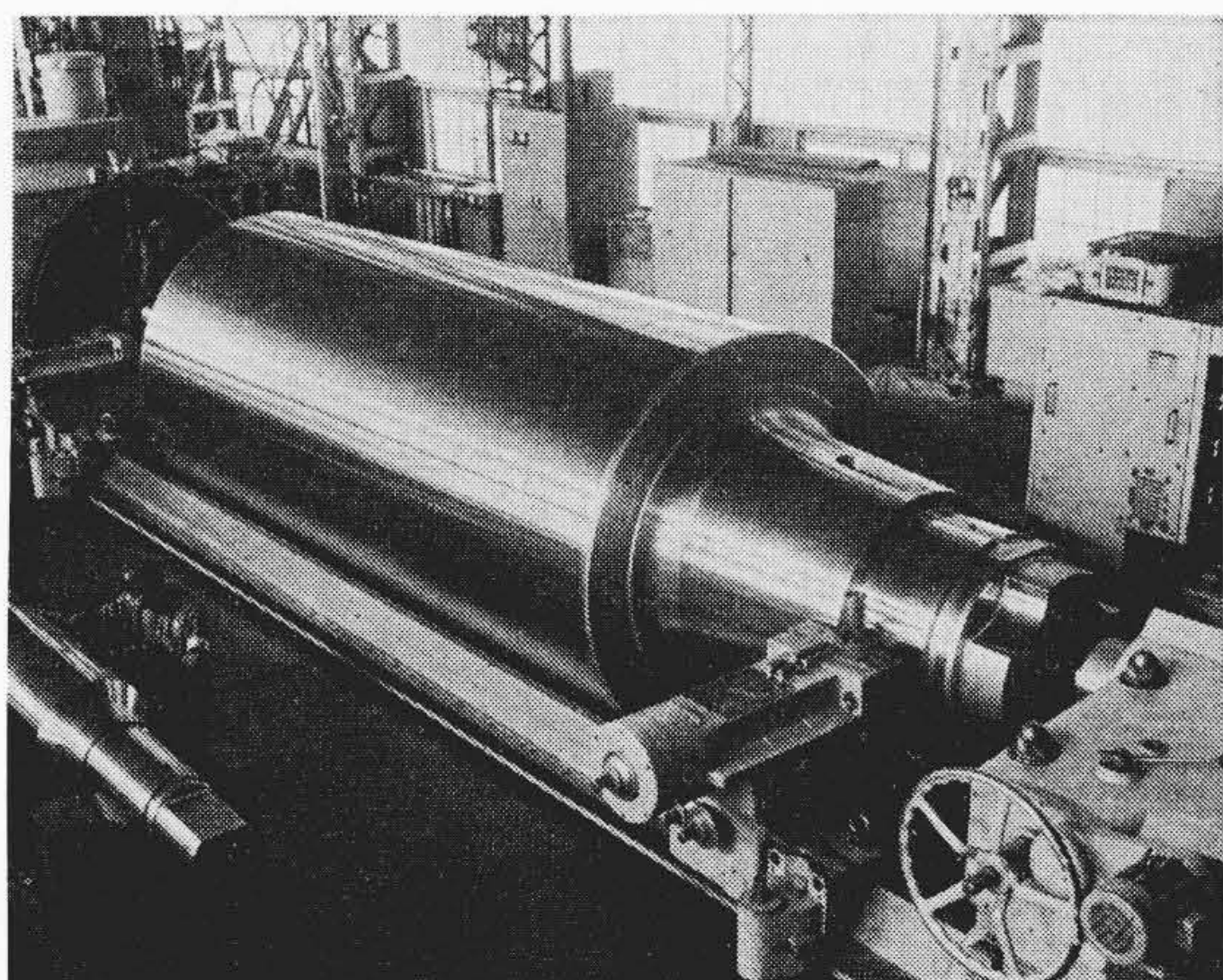


図 10 完成品の外観

れもレスト作業となる。したがって高精度の基準面の作成が重要な作業となる。以下旋盤作業と研削盤作業について述べる。

4.1 旋 盤 作 業

旋盤作業においては強力大形ロール旋盤に特殊加工装置を製作使用してレスト部基準面を作り、2基のローラ振れ止めを使用してロール重量を受け、正確に心出しして主軸にかかる負荷を軽減している。また軸方向（スラスト方向）の動きを押えるためには特殊自動調節式センターを利用し荒削り、中削りならびに基準面を初期の仕様を満足するように加工した。図9は強力大形ロール旋盤上で荒削り作業中の厚板補強ロールの外観である。

4.2 研 削 作 業

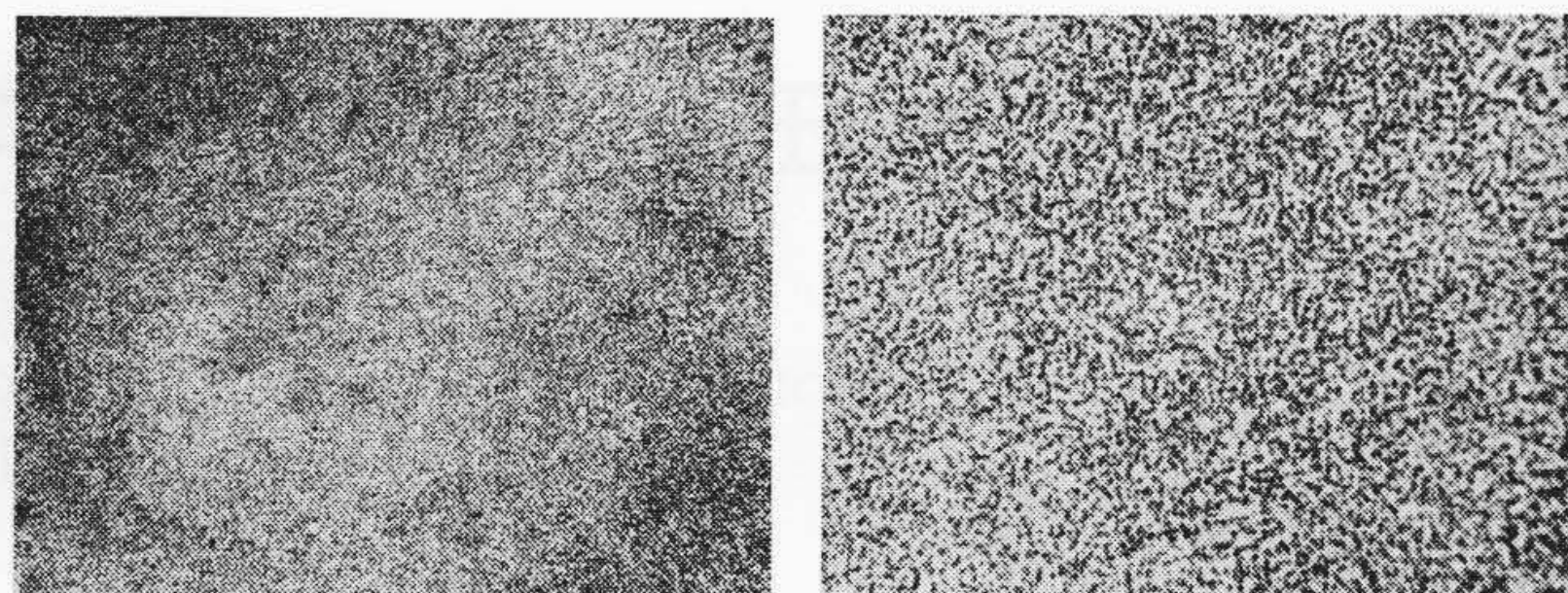
超大形厚板補強ロール（130 tを越える）の研削作業における加工精度の良否はレスト部の基準面の精度いかににかかっている。基準面の真円度修正研削作業の難易は前加工の旋盤加工精度と研削作業者の熟練度ならびに研削諸元に影響される。研削中に振れ量を十分に観察し、研削と石のドレッシングと切込み量に注意しながら作業することによって数 μ 以内の基準面の精度を作ることができた。この基準面部を利用して以後の研削仕上げを行なった。しかもレスト部においては規定以上の面圧がかかるので摩擦抵抗を減ずるために高压でしかも高粘着性の特殊潤滑油を強制給油することにした。

このような新加工法によって超大形厚板補強ロールに対する顧客要求仕様を十分に満足する高精度な加工を行なうことができた。図10は超大形厚板補強ロールの完成外観である。

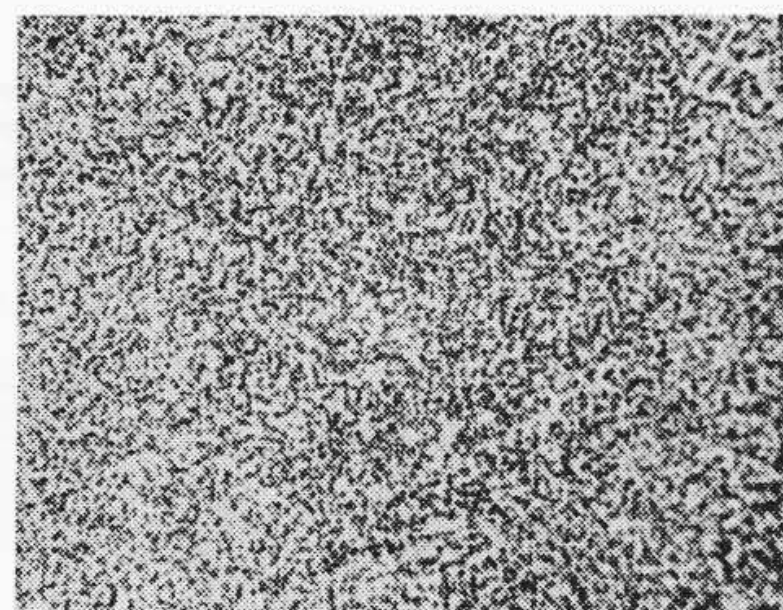
5. ロ ー ル 品 質

5.1 第一段熱処理後の品質

大形厚板補強ロール第一段熱処理後の胴部かたさおよび組織の一



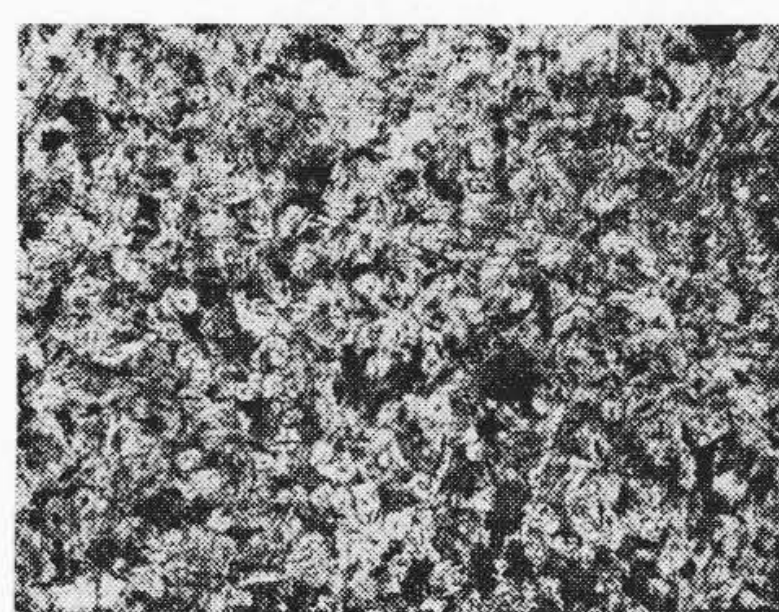
(倍率 100)



(倍率 400)

胴測定位置 測定面	1	2	3	4	5
a	33.0	32.0	32.5	33.0	33.0
b	32.5	32.5	32.0	32.0	32.5
c	32.5	32.5	32.0	32.5	32.0
d	32.0	33.0	32.5	32.0	32.0

図 11 第一段熱処理後の組織, かたさ (ショアー)



(倍率 100)



(倍率 400)

胴測定位置 測定面	1	2	3	4	5
a	47.0	47.0	47.5	47.0	47.5
b	46.5	46.0	45.5	46.5	47.0
c	47.5	47.0	46.5	47.0	47.0
d	48.0	47.5	47.5	47.0	47.5

図 12 仕上がり状態の組織, かたさ (ショアー)

例を図11に示す。この状態はロール内外部の均質化を目的としているので組織は完全な球状セメンタイトである。

5.2 仕上がり状態の品質

完全仕上がり時の胴部組織およびかたさの一例を図12に示す。組織は焼戻ベーナイトと焼戻ソルバイトの微細混合組織であり、かたさもバラツキが少なく所期の目的を達している。

大形厚板補強ロールの内部性状を探索するためにはスペリー形超音波探傷器を使用し探傷周波数0.5 Mcと1 Mc, 接触媒質にマシン油を使用してロールの軸方向ならびに半径方向より精密に全面探傷を行なった。この結果は各探傷位置とも底面波が1~6回ほど返っているため内部欠陥のない健全なロールであることが明らかになった。

6. 結 言

今回、世界的に誇り得る130 tを越える高品質の超大形厚板補強ロールを製造する機会を得た。本報告はロール製造に際して主要工程である鋳造、熱処理、機械加工などについて個々の研究成果と合わせてその概要を取りまとめたものである。従来、この種の超大形厚板補強ロールの製造は予想し得なかったものだけに各製造部門ごとに綿密な技術的、設備的対策を施すことによって品質的にきわめてすぐれたロール製造を可能にした。

納入ロールは現在稼働初期ではあるがすぐれた圧延成績を示すものと信じている。われわれは今後ともいっそう製造技術の向上を図り、高品質で、低廉な各種のロールを製造し、需要家各位のご要望に答えるよう努力する所存である。