

特別講演

UDC 621.771.23 : 669.14-413

厚板製造技術の進歩*

濤 崎 忍**

Development of Plate Manufacturing Technology Mill in Japan

Shinobu TOSAKI

1. 緒 言

受注生産を基本とする鉄鋼業のなかにあつても、厚板製造の特質はほとんど一品ごとに仕様の異なる製品を大量に生産し、しかも素材から製品にいたるまでには多数の工程を必要とすることにある。このような多品種大量生産プラントにおいてコストの低減や品質の向上をはかるには操業、設備、自動化、生産管理、などあらゆる分野での技術開発が不可欠であつた。鉄鋼業を取巻く経済情勢の変遷により力点の置方は変化してきたが、わが国鉄鋼業は一貫してこれら技術の開発に努力し、その成果が今日の厚板業界の発展をもたらしたといえる。以下最近の厚板業界の発展を支えてきた技術の進歩について概説する。

2. 戦後の厚板業界の発展

わが国の鉄鋼業は戦後目覚ましい発展をとげ、生産量においては米国、ソ連について世界第3位の地位を占めている。なかでも厚板の生産量の伸びが顕著であつて、図1に示すように世界第1位であり、品質、歩留、コストなどあらゆる面で最高水準にある。これは造船業界をはじめとするわが国の重化学工業の飛躍的な発展によるところが大きい

が、他方、厚板業界でも量的拡大の過程で合理化によるコストダウンスに徹し、安価で高品質の鋼板を需要家の工程に合せて納期どおりに供給してきたことが今日の発展をもたらしたといえる。

また、需要業界の設備の大型化、工程の合理化が進むに従つて、厚鋼板への要求もより高度の品質、より大寸法、大単重のものへと拡大されていつたが、これに応じて新設備建設や設備改増強、あるいは新製品開発によつてこれらの要求を取込んでいつた。表1は各種新製品の開発状況の一例である。高張力鋼の非調質分野では制御圧延法により、低温靱性にすぐれた安価なラインパイプ材を開発し、エネルギー資源開発の大きな力となつており、調質分野では焼入れ設備の改良と、成分系の開発により、靱性のすぐれた溶接法の良い極厚高張力鋼をつくりだし、超大橋の架設などに貢献してきた。またLNG用として9% Ni 鋼の生産を可能にし、超高張力鋼においては、新しい強力な圧延機によるクラッド式圧延法により、ロケット用のマルエージング鋼を開発してきた。その他、大入熱溶解用鋼板、耐ラメラテア鋼など、それぞれの要求に応じて新製品を開発してきた。もちろんこれらの新製品は、単に厚板製造技術のみで開発されたものではなく、製鋼技術をはじめとした各専門技術の総合的な成果である。

また厚板業界では各種原単位、歩留、労働生産性などあらゆる面でコスト削減に努力してきた。図2は連続式加熱炉の燃料原単位の推移を示すものであるが、過去10年間で約3分の2に減少しており、これはオイルショック以後、設備の改善や操炉方法の改善により、省エネルギーを積極的に進めてきた結果である。特に最近では、 285×10^3 kcal/t を記録した例もあり、従来に比べて2分の1になつている。

歩留についても図3に示すように、最近の10年間で約8%も向上しており、欧米諸国の実績を大きく引離している。図4は厚板業界の労働生産性を示すものであるが、昭和30年代に比べて2.5倍にも達している。今日のわが国を代表する厚板工場群は、大半が昭和40年代のものであり、それ以前のものも逐次改造、増強が加え

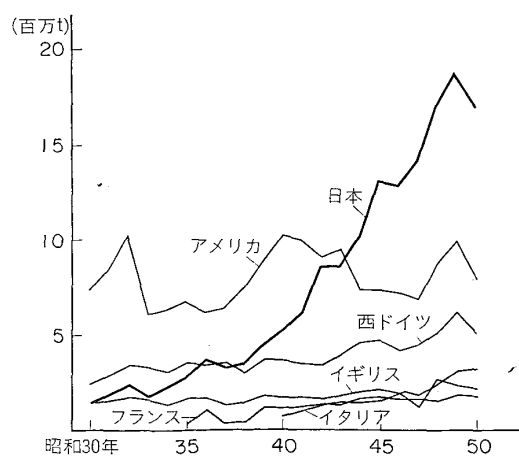


図1 世界主要国の厚板生産量

* 昭和52年10月2日本会講演大会における特別講演

** 川崎製鉄(株)水島製鉄所副所長 (Mizushima Works, Steel Corp., 1-chome Kawasaki-dori Mizushima Kurashiki 712)

表 1 厚 板 新 製 品 の 開 発

年代	昭和35年以前	昭和36年～40年	昭和41年～45年	昭和46年以降
分類				
高張力鋼	非調質鋼		Nb鋼(50～60キロ鋼) ラインパイプ用鋼 ($\times 52 \sim \times 65$) 80キロ鋼 熱間加工用60キロ鋼	ラインパイプ用鋼 ($\times 70$, 耐HIC鋼)
	調質鋼	60キロ鋼(浸漬焼入れ) 80キロ鋼(浸漬焼入れ)	60～80キロ鋼 (Roller Quench) Ni-less 80キロ鋼 MB鋼 LowC 50 キロ鋼	極厚調質鋼 (60～80キロ鋼) 低表面硬度60キロ鋼 大入熱溶接用80キロ鋼 LowC 60キロ鋼
低温用鋼		9% Ni 鋼 3.5% Ni 鋼	低温用40, 50キロ鋼	5.5% Ni 鋼
超高張力鋼		100 キロ鋼 HT200V (マルエージング) HT140 (マルテンサイト)		HT100
その他	造船材(40キロ鋼) 耐候性鋼 耐海水性鋼 工具鋼 プレス成形用鋼 クラッド鋼(爆着, 圧延)	造船材(50キロ鋼) シヨット・塗装鋼板 ホットプレス用鋼 合金工具鋼 ボイラー・圧力容器用極厚 鋼板 原子力用鋼板(PCV.RPV)	IN鋼	大入熱溶接用造船材 テーパーステール (長・幅) 差厚プレート 高温高強度鋼 鋳込クラッド鋼 耐焼戻し脆化 Cr-Mo 鋼

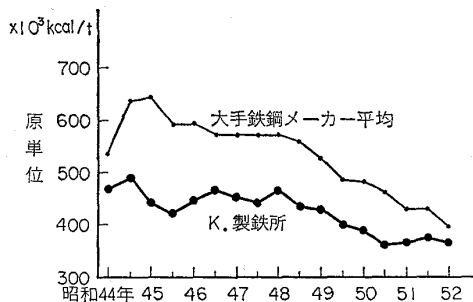


図 2 厚板連続式加熱炉燃料原単位の推移

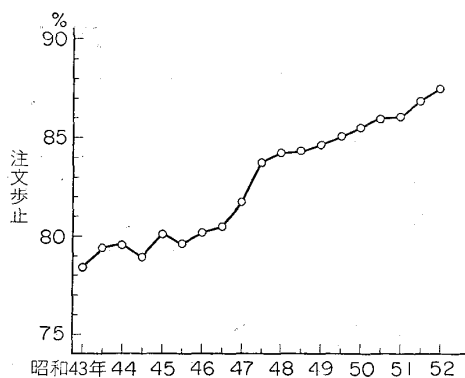


図 3 大手鉄鋼メーカー厚板注文歩留の推移

られ、40年代の厚板工場と同じレベルになっており、コスト低減に大きく寄与している。

以上のように、各社が互いに研さんを重ね、操業技術、設備技術、管理技術などあらゆる分野での努力を重ね、それを集積していわゆる自動化を推進してきた結果が今

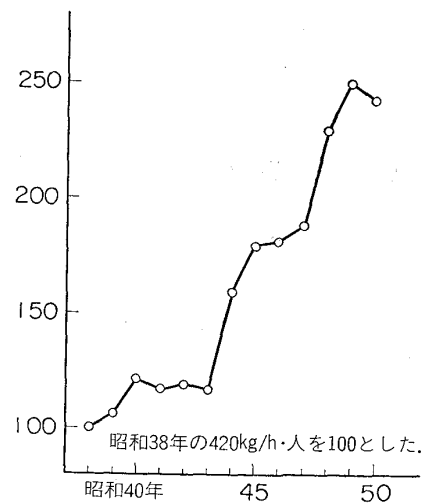


図 4 厚板の労働生産性の推移

日の厚板業界の発展をもたらしたといえる。

3. 設備技術の進歩

歩留、生産性、厚単位の向上をもたらした一因として厚板の製造設備の発達があり、図5にその一例を示している。最近の厚板製造に関する設備技術の進歩は大別して3つの期間に区分することができる。第1期は昭和30年代で、外国の技術を積極的に導入し、今日の発展の基礎を作った揺らん期ともいべき時代であり、主要設備は海外からの輸入に依存していた。

第2期は昭和40年代で、この時代は外国メーカーとの技術提携のもとに、圧延機をはじめとする主要設備の製作が国内で可能となった時代である。操業で得たノー

年代	昭和30	35	40	45	50
設備	第1期		第2期		第3期
加熱炉		○ 6帯式	○ エキストラクタ	○ エキストラクタ	○ エキストラクタ
圧延機	○ 3重+4重圧延機	○ 3重+4重圧延機	○ 4重+5重圧延機	○ 4重+5重圧延機	○ 4重+5重圧延機
剪断ライン	○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング
熱処理		○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング
省力機器		○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング	○ ローリング

図5 厚板製造設備技術の進歩

ハウが設備の設計、製作に迅速に反映され、附属設備を含む圧延設備が大きく進歩するとともに、レイアウトについてもわが国独自のものを打出すにいたった。外国で開発された設備が、日本で開花した時代といえる。

鉄鋼業のような装置産業においては、生産性向上がコスト低減にとって効果的であり、戦後一貫してスケールメリットを追求し、設備の近代化をはかつてきた。その典型的な例を昭和42年以降大手鉄鋼メーカーが相次いで建設した新鋭厚板工場にみることができる。それまでの単一厚板工場の生産量が150万t/y以下であったものが250万t/yにも達するようになった。

昭和40年代も後半に入ると、日本経済の伸長は労働力不足、特に若年労働力の不足をきたし、賃金の上昇に拍車をかけることになった。そこで従来の生産性や歩留の向上に加えて、省力ないし労働生産性の向上がコスト低減の有効な手段として、取上げられるようになった。厚板工場には素材から製品にいたるまでに多くの工程があり、そのなかには全面的に人手に依存した作業も多く省力機器の開発が積極的に進められ、一部はこの時期に実用化された。

第3期は昭和50年代であつて、わが国固有の厚板製造技術が開花した時代である。主要設備は超大型、高速、高精度化され、省力機運にのり鋭意開発を進めてきた各種自動化機器が完成域に達し、さらに外国に例をみない高度な自動化技術、制御技術を総合化することによってノーマンコントロールを指向した厚板工場が出現するにいたった。新日鉄・大分、日本鋼管・扇島、川鉄・水島の第2厚板がそれに当る。

3.1 加熱炉

加熱炉については第1期では設備費の安価な炉長の短い高負荷炉が大勢を占めた。第2期では従来の3帯式などの加熱炉に代つて6帯式の加熱炉が多くなり、ホットスキッド方式やウォーキングビーム式が採用され、スラブ抽出時の衝突疵対策としてエキストラクターが採用されるようになった。第3期に入ると、省エネルギーを目指して炉長を長くした低負荷炉となり、さらには予熱帯での噴流予熱の採用などエネルギーコストの上昇に対処した諸対策がとられている。

3.2 圧延機

第1期で日本鋼管の鶴見製鉄所において3重+4重方式、ついで八幡製鉄所において2重+4重方式が採用され、従来のラウト式3重圧延機に代つて4重可送式圧延機を持つ厚板工場が誕生した。主として粗圧延機には古いものを利用した時代である。これにより生産能力は飛躍的に向上するとともに、4重式は圧延機の剛性もすぐれるため広幅材の高精度圧延が可能となつた。

第2期では粗・仕上圧延機ともに4重式が採用されるようになり、さらに高い生産性が達成され、またワークロールのクイックチェンジが取入れられるようになった。さらに圧延精度、歩留の向上をめざして圧延機制御技術の開発が積極的に進められ、スキッドマークによる板厚偏差を制御する自動板厚制御（以下AGCという）、クラウン低減のためのバックアップロールベンディング、さらには圧延機のコンピューターコントロールが導入されるようになった。

第3期においては、圧延機は超大型、高速、高精度のミルとなり、またより応答性のすぐれた油圧AGCが厚板にも採用されるようになった。大型圧延機的能力を限界にまで活用することは、手動圧延では不可能に近いので、圧延機の可逆シーケンス制御を含む、全自動圧延が定着するにいたった。この間の厚板工場の大型化の過程は圧延機の諸元にも端的に表われており、これを図6に示す。

3.3 剪断ライン

第1期においては薄物剪断はロータリーシアー、ロータリースリッター、厚物剪断は普通のギロチンタイプのシアーであつたが、能率も悪く、剪断精度もあまりよくないものであつた。第2期は品質、歩留の向上をめざした時代で、表面疵の発生しないウォーキンググリッドタイプのクーリングベッドが採用され、シアーも剪断面や剪断精度の向上をめざしてダブルサイドシアー、ローリングカットタイプのシアーがつぎつぎ採用され、また昭和30年代の工場にもこれらのシアーが増強されている。第3期に入ると、これらシアーは精度面、能率面で

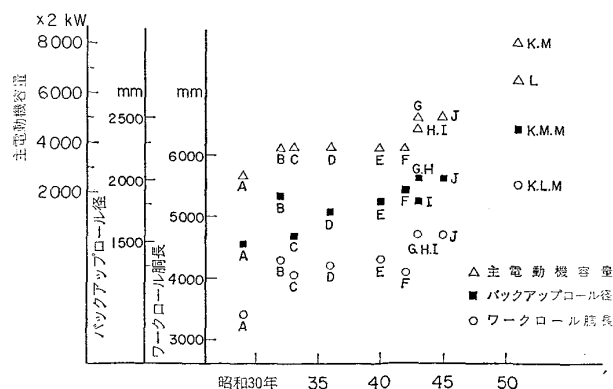


図6 厚板圧延機主要諸元の変遷

Cは速い応答性を要求されるために、実用化が遅れていたが、低慣性高出力電動機や応答性のすぐれたサイリスタ速度制御装置の出現が厚板圧延機のAGCを可能とした。AGCは昭和42年以降に建設された厚板工場から導入されるようになったが、板厚偏差の低減による品質、歩留の向上、加熱炉の実質的能力の向上などの効果が認められ、それ以前の厚板圧延機においても設備改造時に導入され、今日では圧延機にとって不可欠な制御装置となっている。

厚板圧延機では厚板を均一に制御することを目的とした単純なBISRA方式のAGCが採用されてきたが、最近ではミニコンを用いてゲージメーター式により絶対板厚を検出して圧下を制御する絶対値AGC、より速い応答性を追求した油圧AGCも採用されるようになった。

4.2.2 コンピューターコントロール

厚板圧延機では多様な鋼種、寸法の製品の圧延が要求されるために、コンピューターコントロールの実現には適用性の広い制御モデルの開発が必要であった。コンピューターコントロールの開発は昭和40年頃から進められてきたが、わが国においては圧延理論にもとづく制御モデルの開発や大型計算機を用いたシミュレーションによる圧延現象の定量的な解明が行なわれ、適用性のすぐれた高度な制御モデルが開発された。他方、コンピューター自体もパフォーマンスが向上し、これら高度なモデルを用いたオンライン制御が可能となり、センサーの精度や信頼性の向上とも相まって計算機圧延が操業に定着するにいたった。

図8は制御モデルと制御機能との関係を示すものである。鋼板温度や圧延荷重の予測モデルの開発により、板厚制御や板幅制御に関する課題はほぼ解決し、現在では形状制御に重点が移っている。良い形状の鋼板を圧延するには、圧延中の板クラウンを所定の値に制御することが要求され、圧延中の板クラウンを計算するモデルが必要である。板クラウンは大きくはロールのメカニカルクラウン、圧延荷重や板幅に依存するために、これらの要因にもとづき、板クラウンを定量的に把握し形状を制御

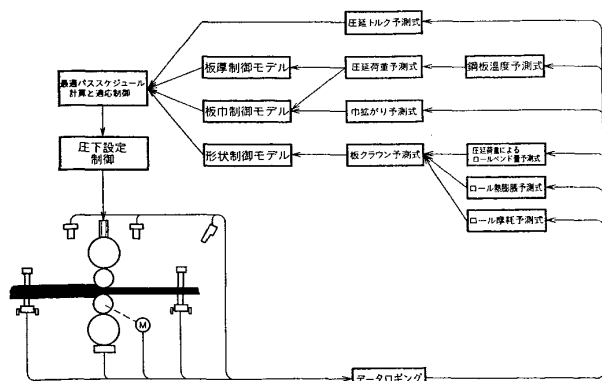


図8 圧延理論の厚板ミル計算機への適用

する方式が開発された。しかしながら板クラウンは圧延中のロールの熱膨張や摩耗によってもかなり影響を受けるために、形状制御の適用性と精度を向上させるには熱膨張や摩耗を考慮したモデルの確立が必要である。また最終的には形状検出器からの信号にもとづく形状の適応制御機能が必要であり、現在ではこれらモデルの開発に関心が移っている。

以上のような制御モデルの開発努力の成果は昭和50年代に稼動した超大型圧延機のコンピューター圧延の適用率に端的にみることであり、これらの圧延機では工場稼動時より自動圧延率はほぼ100%である。また機能的にも従来は圧下設定のみを自動化した半自動圧延が主体であったが、圧延時の可逆シーケンスを含み全圧延ラインを制御する全自動圧延が実用化するにいたっている。

4.3 剪断ラインの自動化

剪断ラインには剪断の他にマーキング、検査、手入れといった多くの工程があり、しかも剪断以外は人手に依る労働集約的作業が多く、最近の労働生産性向上に対する強い要請に応えるには、剪断ラインの各工程の自動化と工程間の鋼板搬送の自動化が不可欠である。またこれらの自動化は作業の安全性向上、重筋高熱作業の排除、作業の正確性を通じての品質向上、高速化による生産性向上といった多くの附随的な効果をもたらすために、各社とも積極的に開発を進めてきたが、その結果現在では2、3の課題を残して実用段階に入った。以下に剪断機の制御、鋼板搬送の自動化、マーキング作業の自動化について最近の成果を簡単に紹介する。

4.3.1 剪断機の制御

剪断ラインにはクロップシアー、サイドシアー、スリッター、エンドシアーなどが設置されているが、これら剪断機の効率的な操業のために、自動プリセット制御(APC)による各種位置決めや剪断シーケンス制御が導入され、剪断精度の向上、剪断時間の短縮による能率向上などの効果がもたらされている。特に剪断ラインの短縮による設備費の削減を狙ったサイドシアーとエンドシアーあるいはサイドシアーとスリッターを組合せたコンビネーションシアーの制御、さらには最近のエンドシアーの自動測長剪断は制御装置の進歩によつて初めて実現が可能となった。

4.3.2 鋼板搬送の自動化

全長1kmにも及ぶ剪断ラインのテーブル上を大小さまざまな鋼板を効率よく搬送し、各設備に精度よく供給する機能は高度に自動化された剪断ラインの実現には欠かせない技術である。搬送の自動化は昭和43年ごろから試みられたが、精度、信頼性ともに不満足で、実用化にいたらず、各工程ごとにオペレーターを配置し、目視で鋼板位置を確認し、手動運転にて搬送していた。

図9は最近開発された自動鋼板搬送の一例を示すものであるが、その特徴は精度と信頼性のすぐれたトラッキ

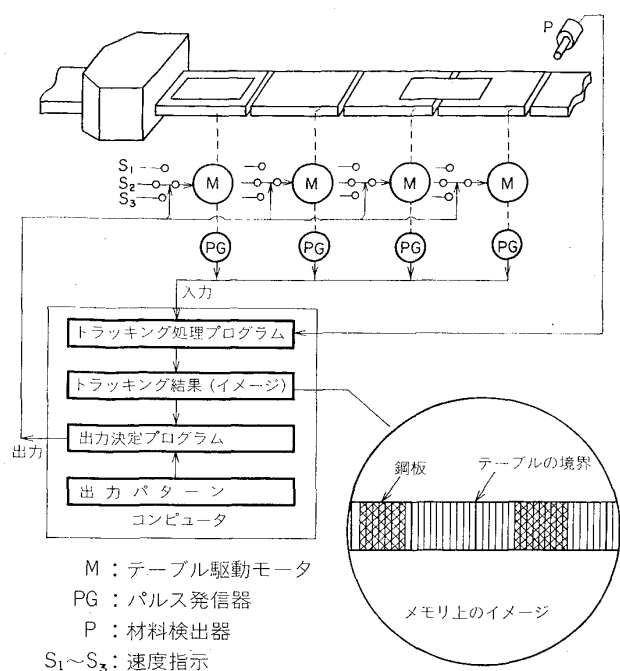


図9 テーブル鋼板自動搬送概念図

ング方式を採用していることにある。従来この種のトラッキングに使用されていたフォトセル方式の鋼板検出器は鋼板位置の校正用に小数を要所に設置するにとどめ、代りに各テーブルに接続されたパルスゼネレーターの信号にもとづき鋼板の移動量を検出し、コンピュータのメモリ上に鋼板位置をイメージとして記憶する。このようなトラッキングにより、ライン上のすべての鋼板位置を精度よく検出し、次工程ないし先行する鋼板の状況を考慮した適切な駆動指令を各テーブルに与える。この方式により搬送は完全に自動化され、能率面、精度面でも手動運転を上回り、さらに切断機の制御装置、自動化機器との結合により全自動の切断ラインが実現した。

4.3.3 マーキング作業の自動化

近年鉄鋼業においては省力を主目的とする自動化の開発を各社とも強力に推進しているが、厚板のマーキング作業の自動化はその典型であつて、著しい進歩をとげている。切断ラインには後続工程の補助的作業である採寸・野書作業、現品の識別や仕様表示のために表示、刻印、ラベル貼付といったマーキング作業が必要である。これらの作業は多くの要員を必要とするだけでなく、単調な繰返し作業が多く、また作業環境も悪く、鋼板に接する作業であるために危険を伴いがちであるなどの理由から、これら作業の自動化を目的とした省力機器の開発が進められてきた。

採寸、野書装置は計算機からの指令にもとづき、移動式の野書装置が所定の位置に移動し、野書線をマーキングするものが主流である。この作業はあくまでも後続工程での表示、刻印位置などを示す補助的な作業であり、最近の厚板工場では切断ラインの全工程が自動化され、

採寸・野書工程そのものが存在しない工場もある。

表示装置としてはステンシル方式と輪転印刷方式の2つの方式が開発されている。ステンシル方式は計算機からの指示により予めステンシルペーパーに表示文字などをパンチする装置、さらにはコンベアーにてステンシルを鋼板上に送込み、吹付け表示までを自動化した装置がある。輪転印刷方式は表示桁数だけのベルト上にゴム印が配列されていて、計算機の指令によりベルトを回転して選字し、鋼板上に輪転印字するものである。

刻印機は計算機の指令によつて刻印を自動選定し、ハンマーにて打刻する方式が採用されている。厚板では仕様を印刷した細長いラベルを製品の端面に貼付することが要求される。当初は通常のタイプライターによるラベル印字の自動化にとどまっていたが、最近ではラベルの貼付までが自動化されるようになった。

これらの省力機器は機構部、制御部ともに複雑なものが多く、開発当初は信頼性の面で難点があつたが、その後の改善努力の蓄積や、故障時の自己診断機能の充実などの保全性向上対策により通常の機械設備に近い信頼性が得られるようになっていく。

4.3.4 検査の自動化

検査は品質保証の要であり、特に最近の大型構造物、圧力容器、ラインパイプ材などの使用条件の厳しい材料については、嚴重な内部欠陥検査、機械的性質の試験が要求される。

内部欠陥検査については昭和36年頃より超音波探傷技術の開発が進められた。当初は熟練者が探傷信号より欠陥を判定する手探傷が普及したが、欠陥検出能の向上と安定化、処理能力の向上、さらには省力を指向した自動探傷装置が開発された。最近ではミニコンの発達により、図10に示すようにデータ処理はもちろんのこと合否判定までが自動化されるようになった。

製品の各種機械的性質は鋼板の一部より採取した試験片を用いた破壊試験によつて検査される。試験片の管

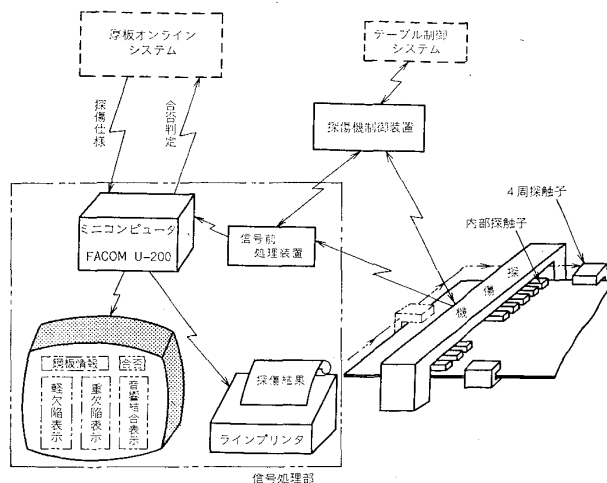


図10 自動超音波探傷装置の構成

理，ハンドリング，加工，試験，情報処理は複雑で多数の要員を必要とし，また試験結果が判明するまでに長時間を要していた．最近ではNC技術に応用した試験片加工，ロボット技術による試験片の着脱を含む自動機械試験，データ処理のコンピューター化が進められ，機械試験の能率向上，処理時間の短縮と試験要員の削減がはかれるようになった．

5. 生産管理システムと総合化

厚板製造の進歩に大きく寄与した技術に生産管理システムをあげることができる．受注生産方式をとっているために，個々の製品に対する需要家の厳しい品質，納期上の要求を満足させ，かつ設備の持つスケールメリットを活かした高生産性を達成するという2つの相矛盾する命題を両立させる必要がある．そのためには製鋼工場に始まる厚板の各製造工程にコストミニマムとなるように適切な生産命令を与えるとともに，品質，歩留，工程進捗などの強力な管理を必要とする．それには大量の情報処理を必要とし，また人手では信頼性の点でも不満足であつたために，生産管理のコンピューター化が進められた．鉄鋼業は生産管理のコンピューター化が進んでいる業界であるが，なかでも厚板は仕様の一品一葉性の故に生産管理システムの必要性が強く，早くから開発が進められ，現在では図11に示すように受注から出荷までの一貫管理体制が確立されている．

厚板の生産管理システムは昭和36年頃より実施された素材設計，作業命令作成のコンピューター処理に始ま

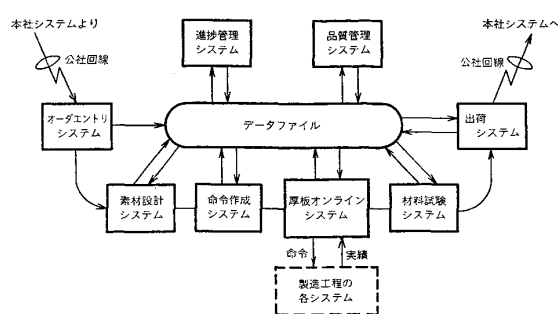


図11 厚板生産管理システムの構成図

る．仕様の異なる製品より同一鋼種，同一厚みものものを組合わせて圧延単位のスラブに，ついで鋼塊に，さらに転炉の出鋼単位にまとめる素材設計と，この素材設計をもとに各製造工程に適切な作業命令を流す命令作成のシステム化がなされ，素材設計精度の向上による歩留の向上，素材単重の大型化による能率の向上など多くのメリットがもたらされた．

一方，厚板工場においても製品一枚ごとに異なる仕様の鋼板を効率よく生産するには，各工程に適切な作業指示を与える必要があり，昭和42年にはオンラインシステムが開発された．これは素材の流れに同期してリアルタイムに最適化した作業指示を各製造工程に与え，かつ迅速に実績収集を行なうものであり，素材の円滑な流れによる生産性向上と管理レベルの向上による品質向上，納期確保などの需要家サービスの向上に大きく貢献した．一般に厚板オンラインシステムは生産能率を50%も

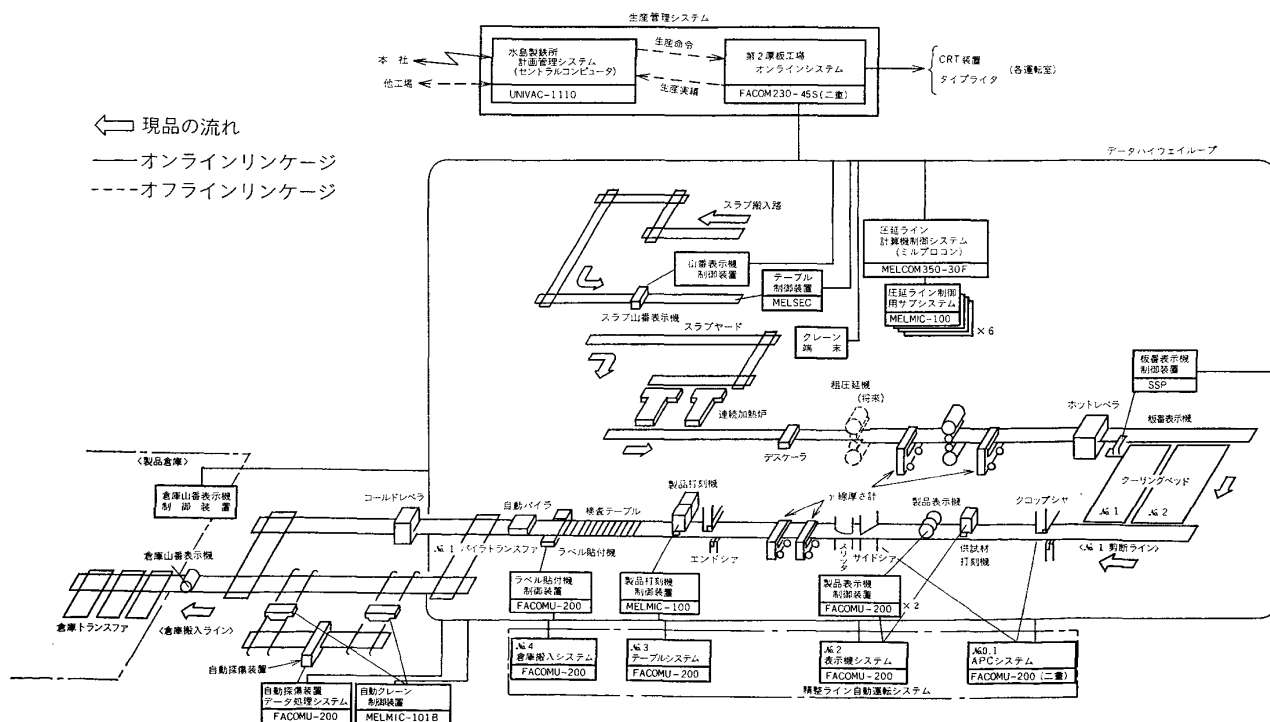


図12 水島製鉄所第2厚板工場トータルシステム構成図

向上させるものと評価されている。最近ではデータベースの手法が取り入れられ、各種情報が一元化され、より高度な品質管理、工程進捗管理を可能としており、図11に示す一連の機能により Plan-Do-See の管理サイクルを構成している。

厚板製造における自動化は生産管理ないし情報処理の自動化と各製造工程の自動化という2つの次元から取組まれてきた。この2つの自動化を互いに直接結合することは、両者の相乗効果によつて一層大きな成果がもたらされるために、厚板製造の場面では常に生産管理システムを頂点とする総合化された自動操業システムが指向されてきた。上位生産管理システムと下位システムを直結し作業指示、実績を人手を介さないで授受することは、能率、正確性、省力面での効果をもたらすだけでなく、究極的な目標である厚板工場全体の最適操業を可能とするものである。最近建設された厚板工場においては、両者を有機的・一体的なものとして結合し、操業者の役割を総合的な監視と異常の処置にとどめる高度に自動化された圧延工場を実現している。

一例として図 12 に水島製鉄所の第2厚板工場トータルシステムの構成を示す。生産設備とシステムとの適切な結合により、稼動後1年数ヶ月を経過した現在、1級歩留で 92.3% の世界記録を樹立するなど極めて順調な立上りを示している。

6. 結 言

以上厚板製造技術の進歩について、設備技術、自動化技術ならびに生産管理システムと総合化の3つの局面から簡単に説明してきた。これらの技術は厚板製造技術の進歩に大きく貢献し、理想とする無人圧延工場の実現に一步近づくことができた。しかしながら、現在の厳しい経済情勢を克服し、世界の厚板業界をリードし続けるには今後とも新製品の開発、未完成分野の自動化技術の開発に力を注ぎ、よりすぐれた厚板製造技術の確立をめざして前進を続ける必要がある。著者は今後ともこの方面の技術の進歩に微力を尽す所存であり、関係各位の御指導を切に希望する次第である。