
鉄鋼生産の変革と設備技術の発展

Progress of Mechanical Equipment, Process Control and Instrumentation Technologies
for Innovation in Steel Production Processes

松田 恵嗣(Keiji Matsuda) 増野 豊彦(Yasuhiko Mashino)

要旨：

過去 10 年間ににおける鉄鋼業を取り巻く経営環境は、日進月歩のごとく目まぐるしく変化してきたが、川崎製鉄では世の中の技術進歩や顧客のニーズを踏まえながら設備技術の向上をはかってきた。設備技術とは、基礎研究で得られた製品製造技術をコマーシャルベースで製造プロセスに具現化する技術、製品の製造過程で起こっている現象の解明に基づいて既存プロセスのハード・ソフト面を改善する技術および既存設備の生産性向上を指向した設備管理技術であり、鉄鋼製造技術の根幹を構成する重要な要素技術の一つと考えられる。本稿では、川崎製鉄の鉄鋼生産を支える設備技術のハード、ソフトの技術開発動向を過去 10 年間を中心に総覧し、技術トピックスとして、高炉の超短期改修技術、高品質铸片製造技術、連続熱間圧延技術、熱間圧延仕上ミル最適制御を紹介するとともに、設備技術に関する今後の展望についても言及する。

Synopsis：

Steel business has encountered very rapid and drastic changes in economical circumstances for the last decade and Kawasaki Steel has continuously developed mechanical equipment, process control and instrumentation technologies by applying various kinds of fundamental researches and taking into account customers, requirements. These technologies constitute the most important technological elements in steel production process and include the following 3 fields: (1) Design and construction of commercial production process based on fundamental basic research results, (2) Improvement in production process based on the analysis of phenomena, and (3) Increase in the productivity of existing plant through equipment administration. This paper reviews the technical development of Kawasaki Steel in the above-mentioned fields during the last decade, and introduces some technical topics, e.g., "Ultra-short term revamping of Chiba Works No. 6 blast furnace", "High quality cast products in steelmaking and continuous casting process", "Continuous hot strip production", and "Optimal control for hot strip finishing mill". The perspective of steel production process in the future is also described.

本文は次のページから閲覧できます。

Progress of Mechanical Equipment, Process Control and Instrumentation Technologies for Innovation in Steel Production Processes



松田 恵嗣

Keiji Matsuda

水島製鉄所 設備技術
部長 (現 川鉄マシ
ナリー(株) 取締役水
島事業部長 兼 プラン
ト建設部長)



増野 豊彦

Yasuhiko Mashino

千葉製鉄所 制御技術
部長

要旨

過去 10 年間における鉄鋼業を取り巻く経営環境は、日進月歩のごとく目まぐるしく変化してきたが、川崎製鉄では世の中の技術進歩や顧客のニーズを踏まえながら設備技術の向上をはかってきた。設備技術とは、基礎研究で得られた製品製造技術をコマーシャルベースで製造プロセスに具現化する技術、製品の製造過程で起こっている現象の解明に基づいて既存プロセスのハード・ソフト面を改善する技術および既存設備の生産性向上を指向した設備管理技術であり、鉄鋼製造技術の根幹を構成する重要な要素技術の一つと考えられる。本稿では、川崎製鉄の鉄鋼生産を支える設備技術のハード、ソフトの技術開発動向を過去 10 年間を中心に総覧し、技術トピックスとして、高炉の超短期改修技術、高品質鍍片製造技術、連続熱間圧延技術、熱間圧延仕上ミル最適制御を紹介するとともに、設備技術に関する今後の展望についても言及する。

Synopsis:

Steel business has encountered very rapid and drastic changes in economical circumstances for the last decade and Kawasaki Steel has continuously developed mechanical equipment, process control and instrumentation technologies by applying various kinds of fundamental researches and taking into account customers' requirements. These technologies constitute the most important technological elements in steel production process and include the following 3 fields: (1) Design and construction of commercial production process based on fundamental basic research results, (2) Improvement in production process based on the analysis of phenomena, and (3) Increase in the productivity of existing plant through equipment administration. This paper reviews the technical development of Kawasaki Steel in the above-mentioned fields during the last decade, and introduces some technical topics, e.g., "Ultra-short term revamping of Chiba Works No. 6 blast furnace", "High quality cast products in steelmaking and continuous casting process", "Continuous hot strip production", and "Optimal control for hot strip finishing mill". The perspective of steel production process in the future is also described.

1 緒 言

製鉄業は代表的な装置産業であり、装置産業発展の歴史は設備進歩の歴史でもある。その進歩は、多くの技術プロバイダーの協力による技術進歩の恩恵を被るとともに、鉄鋼業独自の製品開発技術、操業ノウハウ、設備技術などが融合したものである。

この 50 年の技術進歩の中で、鉄鋼プロセスには均一かつ高品質な製品を高効率で連続的に製造することが追求されてきた。設備技術の進歩は、際立つ過酷な環境に耐える強靱な設備を具現化し、膨大かつ複雑な設備の稼働や品質の作り込みを高精度に制御する技術

を確立するなど鉄鋼生産の変革に果たした役割は大きい。

たゆまぬ技術開発は鉄鋼技術の進歩や高効率な生産性の達成に向けて今後も続けられるが、本稿では当社における設備技術の発展を最近の 10 年を中心に総覧し、製造分野別の技術発展について紹介する。

2 設備技術の変遷

2.1 設備技術とその機能

設備技術は工学分野の中の機械工学、電気・計装・システム工学、化学工学などの基礎工学知識をベースに、鉄鋼の製造プロセス(製

* 平成12年5月29日原稿受付

鉄、製鋼、圧延など）固有の課題の解決に当たるが、その主要な機能は以下の3項に集約される。

(1) プロセス開発と設備建設

製品開発や製造プロセス開発によって得られた製造原理を実際の生産設備に具体化する。

(2) プロセス改善

既存の製造プロセスの生産性向上、信頼性向上および高精度化を図る。

(3) メンテナンスと設備改善

個別の装置や部品の強靱化と長寿命化を図りながら、設備の信頼性の向上を図る。

それぞれの機能の根底にある考え方は製造プロセスおよび設備に起こる現象の工学的解明あるいは推定と定量化にある。設備技術の発展は現象の解析とモデル化の蓄積にあると言っても過言ではない。それらの現象の解明によって、導入すべき技術仕様様の精度向上が図られるとともに、技術開発の本質的な方向が明確になり開発効率も大きく向上してきた。

現象の解明に基づく高精度制御のニーズはさまざまなセンシング技術と制御技術を生み、設備の高度信頼性向上のニーズはすでに確立されたとされている汎用要素機器のさらなる信頼性向上に向けた開発を促し、それらの成果は他産業での活用の道を開いている。建設・設備改造の実行の段階では、迅速性・安全性・信頼性などの確保に向け独自のさまざまな施工技術も生まれた。

2.2 川崎製鉄におけるプロセス技術の変遷

2.2.1 製鉄分野

製鉄分野は、膨大な消費エネルギーの削減と発生エネルギーの回収をはかりながら安価な溶鉄を安定供給することが最大の使命である。設備は高温・高圧・磨耗などの過酷な環境下にある。このような環境下での重要課題は安定供給の基本となる設備の長寿命化、設備停止による経済的ロス削減のための高炉改修および設備補修の工期最短化などである。

設備の長寿命化の例では、千葉製鉄所第6高炉は20年9ヶ月の長寿命の世界記録を達成し、水島製鉄所第2高炉は世界記録を更新中である。この高炉長寿命化には、レンガ支持機能を強化した冷却板・ステープ複合構造⁹⁾、末期状態も考慮した構造解析に基づく炉体設計、高信頼性ステープ構造、ステープ診断・補修などの炉体保全技術、境界要素法を用いた高精度炉底浸食プロファイル推定技術⁹⁾などの設備技術が大きく貢献している。寿命50年以上を目指すコークス炉においては、抜本的なれんが更新技術を開発した。

工期短縮化の成果は、次章の大ブロック工法による千葉製鉄所第6高炉62日間改修⁹⁾、耐火物の大ブロック化と短時間昇温技術によるコークス炉の耐火物14日間積み替えが代表例であり、ともに従来期間の半分以下の世界最短期間を達成した。

省エネルギーでは、BDC（高炉乾式集塵設備）において独自の設備保護用緊急遮断とミスト冷却システムを開発し、95%というトップクラスの稼働率を保っている。また、ファジー理論を活用した制御システムを開発し、熱風炉燃焼ガスの熱効率を3%向上させた。

石炭、鉱石などによる磨耗対策などに対してはDEM（離散要素法）による塊粉体の高精度シミュレータを開発⁹⁾し、原料ハンドリング設備の安定稼働を可能にした。Fig. 1に連続式アンローダにおける改善例を示す。また焼結機の給鉱装置開発、高炉装入物形状・分布推定にも活用しており、安価原料使用の有力なツールになっている。

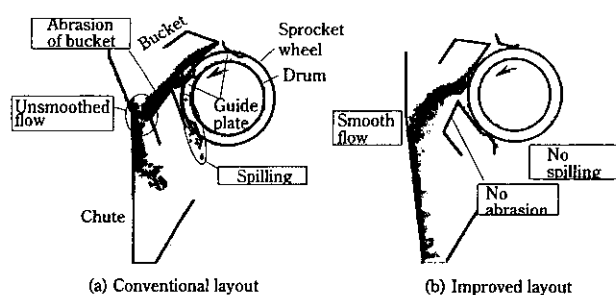


Fig. 1 DEM simulation for discharging behavior of bucket elevator

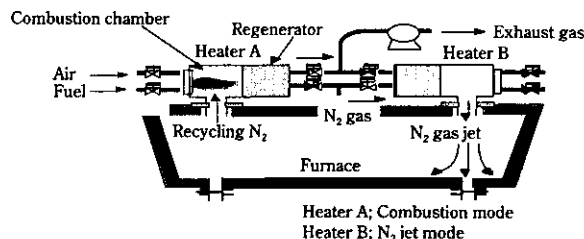


Fig. 2 Tundish equipped with a N_2 jet heater

2.2.2 製鋼分野

製鋼分野は、高品質圧延素材の安価・大量供給が使命である。これに対して、高純度鋼の攪拌精錬と欠陥のない銑片の製造プロセスの改善に注力した。

攪拌精錬に関しては、定量的解析モデルを開発し、千葉製鉄所Q-BOPの導入を契機に発展した上底吹き転炉や溶鉄予備処理などに適用した。その結果、プロセスの安定化と長寿命化が実現された。モデルには、気体の熱膨張などを考慮し、溶鋼・溶鉄内への吹き込みガス量を正確に推定するモデル、羽口の長寿命化を目的とした羽口まわりの温度推定モデル、ガス吹き込み時の転炉炉体の振動を羽口配列まで考慮して予測するモデル、粉体の気体搬送モデル⁵⁾などがある。また、RH脱ガス処理については、下部槽形状の楕円化と排気速度から脱炭速度を推定するモデル⁶⁾により、C濃度15ppm以下の極低炭素鋼の安定大量溶製ニーズに応えている。

鑄造技術については、注がれた溶鋼を割れ・介在物・気泡・中心偏析などの欠陥なく凝固させる技術と、供給された溶鋼を汚染させることなく鑄型に注ぐ技術とがある。前者に関しては、凝固の進行モデル、未凝固部ブールの流動モデル、凝固部の応力・歪推定モデルなどを開発した。モデル予測と実現象と対比させることにより、さまざまな欠陥の発生量を定量的に予測し、その予測に基づいて欠陥を抑制する技術に発展させた。後者に関しては、Fig. 2に示す高温 N_2 ガスによるタンディッシュ無酸化加熱技術(N_2 ガスジェットバーナー)⁷⁾を開発し、溶鋼の再酸化を防止している。

2.2.3 熱間・厚鋼板圧延分野

熱間・厚鋼板圧延分野では、寸法精度・材質を中心とした高品質鋼板製造と高生産性ニーズに対応した技術開発に努め、さらに自動制御技術を融合し、千葉製鉄所第3熱間圧延工場におけるエンドレス圧延技術に発展させた。

鋼板寸法の高精度化に対しては、剛塑性有限要素法に代表される3次元圧延シミュレーション技術を他社に先駆けて実用化し、圧延方法に関する基本的なモデルを構築した。本モデルの活用により、板厚・板クラウン・エッジドロップなどに及ぼす各種因子の影響を定量化するとともに幅方向圧延の現象を解明⁸⁾した。また、実際の

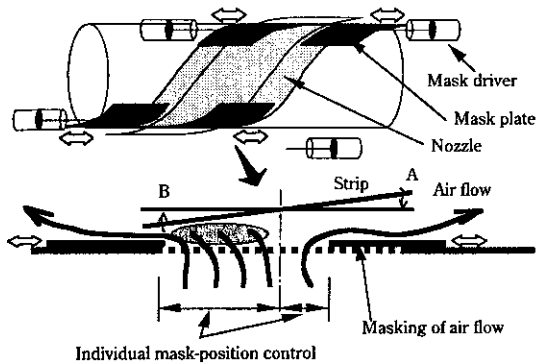


Fig. 3 Helical turner and pressure distribution control system

圧延におけるさまざまな外乱に対して良好な制御性を確保するため、仕上圧延における圧下・張力・材料速度などの複雑な相互干渉を考慮した最適レギュレータ制御⁹⁾や予見制御を実用化し、さらに蛇行などの通板性を考慮した非対称圧延制御技術¹⁰⁾を確立した。一方、機械精度による通板性などへの影響を定量化¹⁰⁾して管理基準を明確にするとともに、圧延ロール拘束機構やワークロールシフト構造¹¹⁾を改善した。

材質の作り込みに大きく影響する加熱・冷却に関しては、加熱炉入り口から圧延後までの鋼板温度推移を正確に予測するモデルを開発し、新製品製造時における操業条件と改造仕様の決定などに活用している。さらに、TMCP 鋼の生産を実現すべく、従来比 1.7 倍の均一強冷却技術を開発した。

圧延と連続鋳造のバランス差を縮小させ、大幅圧下を効率的に可能とする幅圧下プレスなどの新装置を開発し、生産性を向上させた。

また、鋼板寸法の高精度化と現象解明の必要性より、ミル内と直近における水・熱・振動による劣悪環境下においても板厚・クラウンなどの測定が可能な強靱で信頼性の高いセンサを開発した。

2.2.4 冷間圧延・表面処理分野

冷間圧延・表面処理分野では、自動車用や缶用に代表される高耐食性や高加工性などの高機能鋼板の需要増に対応した技術開発および生産性向上と品質向上に関する技術開発を進めてきた。生産性向上に対しては、圧延潤滑技術や軸受潤滑技術および交流可変速モータ利用技術などの開発により、高速通板時の焼付きやチャタリングを防止し、千葉製鉄所 No. 2 TCM において世界最速の 2800 m/min を実現した。また、千葉製鉄所 No. 4 CAL においてはバックリング防止、蛇行防止技術¹²⁾を確立し、1000 m/min での高速かつ安定な操業を達成した。

表面傷防止に関しては、非接触で平面的にパスライン進行方向を変更する技術として、Fig. 3 に示すフローター式ヘリカルターナー¹³⁾を世界で初めて実用化し、千葉製鉄所 No. 2 CAL とスキンプスミルの連続化を実現した。

CGL においては、めっき品質上重要な Zn ポットと浴機器を中心に技術開発を行った。水モデル実験や数値解析によりドロス欠陥 (Zn ポット内での微小異物付着) 防止のためのポット内流動制御技術¹⁴⁾を確立した。また、板幅方向の反り防止技術とガス噴流理論に立脚した付着量制御技術¹⁵⁾により付着量均一化を達成した。これらの技術を集約して水島製鉄所での浴機器リフレッシュを行い、品質安定化と生産能力向上に寄与している。

EGL においては Zn-Ni めっき液への Ni イオン供給技術として世界初の金属 Ni 微粉溶解技術を開発した。また、ロールコートによる塗装現象を弾性流体潤滑理論を適用してモデル化¹⁴⁾し、多様な塗

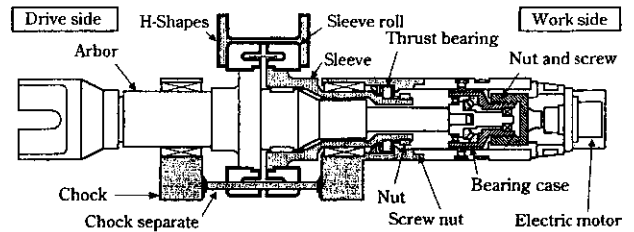


Fig. 4 Schematic of adjustable width rolls

装仕様に対しても均一塗装を可能にした。

2.2.5 条鋼分野

形鋼分野では、建築用 H 形鋼の高精度・外法一定化とサイズレパートリー拡大のニーズに対応するために、設備・センサ開発を中心に多サイズ圧延技術と断面温度制御技術の開発に取り組んだ。

多サイズ圧延の実現は、Fig. 4 に示すオンライン幅可変圧延ロール¹⁶⁾、幅可変矯正ロール、オンラインフランジ直角度矯正機の自社開発により達成し、1989 年より開始した外法一定 H 形鋼の販売に貢献した。また、高寸法精度化に対しては三次元断面寸法・形状を測定可能な熱間センサの開発¹⁶⁾を進め、実用化した。

一方、断面温度制御に対しては、熱間状態をシミュレート可能な実験装置を考案し、フランジ水冷設備の仕様・構造を決定した。

線材・棒鋼製造プロセスにおいても、高精度・サイズレパートリー拡大のニーズに応えるための 4 ロールミルの圧延現象解明に取り組む、三次元圧延の解明が可能な剛塑性 FEM 解析モデルを開発¹⁷⁾した。これにより負荷特性と幅拡がり特性、さらに粗大粒発生限界も定量的に予測可能となり、安定圧延に貢献している。

2.3 設備管理技術

多種多様な巨大設備群を管理する製鉄所では、Table 1 に示すように、1980 年代には個別管理品の保守標準化、機器設計・購入の標準化など膨大な保全に関するデータベースと設備管理システム、設備診断システムを構築し、少人数で効率よく管理するための現在の設備管理の基本的な姿ができていた。

続いて 1990 年代中ばからは最小の保全コストで設備を最大能力にて稼働させることを主眼に、設備の長寿命化、工事施工能率向上などによるメンテナンス対象案件の削減、計画休止の周期延長や時間短縮といった活動を展開してきた。こうした活動は、機器の使用環境に応じた最適構造の設計や最適材質の開発¹⁸⁾、独自の工事治工具や工法の開発といった個別技術および膨大な設備点数の管理業務に対し信頼性工学的な保全計画手法¹⁹⁾や破壊力学を適用した寿命予測技術などの管理診断技術を高度に融合させたものである。また、設備管理の高度化にともない、図面や故障情報などを電子情報化し検索可能とした保全支援システム²⁰⁾を構築した。特にトラブルシューティングに熟練が必要とされる制御設備に対しては、エキスパー

Table 1 Development of equipment management technology

	1980~	1990~	2000~
Standardization		Reliability technology	Extension and concentration of managing subjects
Management system		Advanced diagnosis technology	Managing/diagnosis system down-sizing
Diagnosis system		Device life prolongation	Mechanical element toughening
		Device quick change	

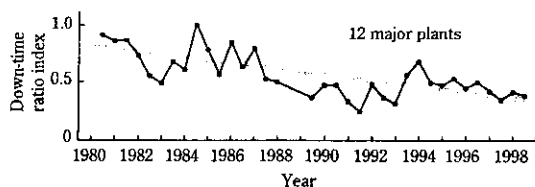


Fig. 5 Trend and down-time ratio (Mechanical equipment)

ト機能を利用した故障推論システム²⁰⁾を開発して業務効率化と故障削減に大きく寄与した。

1990年代後半からは設備管理システムを発展させ、タイムリーな設備改善活動が実施できるようにした。すなわち、製鉄所当たり470万ユニットを超える設備に対し操業変化や経年劣化の度合いに応じ個別ユニットごとに設備状態を定量的に把握できるようにした。こうしたシステムチックな設備管理手法と継続的設備改善により、Fig. 5に示すように最近の10数年で設備故障を約1/2のレベルへ削減した。この期間中、低速回転機器の診断技術や圧延設備の衝撃荷重モデルによる機械精度評価技術などの技術開発成果を得た。

最近では、それまでのメカ技術導入による装置単位での改善では技術開発に限界が見え、自社での機械要素部品の研究開発へと活動範囲を広げてきている。過酷な設備環境で損傷を受けた要素部品の劣化物理現象の解明を行うことで、ユーザーオリエンテッドの開発を進めており、鉄鋼以外の産業への展開の道を開いている。

3 技術トピックス

3.1 高炉超短期改修技術

溶銑の供給停止期間の短縮を図るため、千葉製鉄所第6高炉では大ブロックリング工法を開発し、従来工期の半分に相当する62日間での改修を達成した³⁾。

本工法の概要をFig. 6に示す。旧炉体は大きなブロックで解体・搬出し、新炉体は事前に高さ方向に分割した4個のリング状構造物として製作し、リフトアップしながら順次組み立てていく方法である。従来は炉体を数十tの小ブロックに切断して搬出するのにに対し、本工法では1個あたり1000~1600tのリング状に分割して搬出した。また、炉体の据付方法も従来は数十tの鉄皮を現地で溶接・組立した後、約500枚のステーブを1枚ずつ炉内に組み込んでいたのに対し、本工法では前述のステーブも事前にリング状鉄皮に組み込み、約2000tの炉体ブロックを基礎上に搬送し、上部ブロックより順次リフトアップして組み立てた。

本工法を可能にした技術を以下に示す。

- (1) 2000tのブロックの仮吊り、または炉体全体約5000tを吊るにあたっての大規模構造物解析技術
- (2) 100ケースにもおよぶ荷重条件下で数千の部材応力を効率よく評価する解析処理プロセッサKBSD²²⁾の開発
- (3) 鋼構造物、耐火物の複合構造物の解析技術
- (4) 直径20m近い鉄皮を数mmの精度で製作し、現地肌合わせをなくした高精度溶接・加工技術
- (5) 川崎製鉄グループ内で開発した大重量物の揚重設備、およびその組合せ応用技術

本技術の開発によって改修中の減産抑制と、現地工事を大幅に削減したことによる改修費の削減と作業の本質安全化が実現できた。

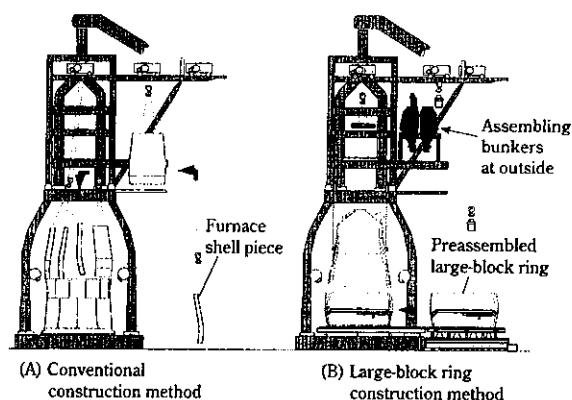


Fig. 6 Comparison between conventional construction method (A) and large-block ring construction method (B)

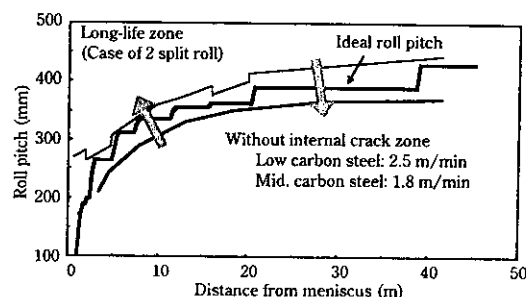


Fig. 7 Concept of roll pitch decision at Mizushima Works 4CC

本工法は次期改修の水島製鉄所第4高炉(2001年秋改修)においても採用の予定である。

3.2 高品質鑄片製造技術

連続鑄造は凝固、伝熱、流動、偏析現象に加え、非線形力学と高温材料物性も絡み合う複雑なプロセスである。欠陥のない高品質鑄片を得るためには、欠陥に及ぼす諸現象を定量的に解明し、操業条件と設備仕様を適正化する必要がある。特に鑄片の内部割れ欠陥は、手入れや圧延工程での除去手段がないため、鑄片冷却、鑄造速度、ロールピッチなどの諸条件が凝固シェルの歪みに及ぼす影響を定量的に解析する技術と鋼種ごとの欠陥発生予測技術^{23,24)}を確立し、高品質鑄片の高効率鑄造を可能とした。千葉製鉄所第4連続鑄造機と水島製鉄所第4連続鑄造機(水島4CC)のロールプロフィールは本技術に基づいて決定した^{25,26)}。水島4CCではFig. 7に示すように、内部割れ回避と設備の長寿命化を両立する適正ロールピッチを決定し、2.5 m/minの高速鑄造を達成している。

一方、近年の自動車用鋼板に代表される薄鋼板の高纯净ニーズは強く、連続鑄造における溶鋼の高纯净化技術は重要である。水島4CCでは耐火物のコストダウンを目的にタンディッシュのホットリサイクルを実施しており、通常の燃焼炎による加熱では付着地金が酸化され鑄造開始時の溶鋼纯净度が悪化する。この問題を解決するために高温N₂ガスによる無酸化加熱技術を開発した。本技術により、タンディッシュのホットリサイクルにおいても纯净度の高い高品質鑄片の製造を可能とした。

また、厚鋼板、線材・棒鋼用素材においては鋼材機械特性を低下させる中心偏析の軽減ニーズが強い。中心偏析とは鑄片断面中央の最終凝固部にP、Sなどの有害成分が濃化・偏在する欠陥であり、軽減方法として電磁攪拌法、ロール軽圧下法などが提案されている。まず、中心偏析の生成モデルを構築し偏析の定量的予測技術を確立

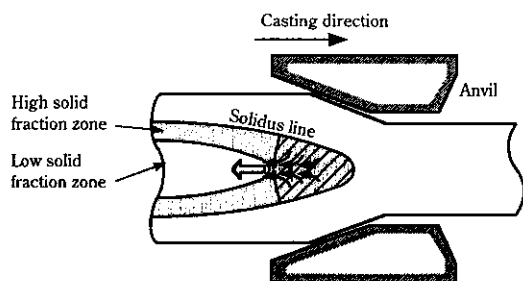


Fig. 8 Concept of continuous forging process

し、これと大圧下時の鋳片変形挙動解析技術を組み合わせることにより、従来の常識を超越した連続鍛圧技術を独自に開発²⁷⁾した。Fig. 8 に示すように、金型による鍛圧を行って凝固末期部の濃化溶鋼を強制排出するため中心偏析を完全に解消できる。本技術の工程設備も川崎製鉄独自で設計を行い、水島製鉄所第3連続鋳造機において実用化し、高級線材・棒鋼素材の高品質化に大きく寄与している。

3.3 連続熱間圧延技術

千葉製鉄所第3熱間圧延工場の建設では、千葉、水島製鉄所の熱間圧延設備および圧延技術における開発技術を基盤にして、熱間圧延技術の限界に挑戦した。従来の常識を越えた少人数生産を可能にした高度自動生産システム、品質競争力を強固にするための最新の制御技術、制御システムの適用に加え、熱間圧延機における技術革新とも言える連続圧延技術すなわちエンドレス圧延技術を世界に先がけて開発した²⁸⁾。このエンドレス圧延技術は、仕上ミルにおける先尾端の非定常現象を回避して圧延の安定性を飛躍的に向上させるとともに、板厚や仕上がり温度などのバラツキを低減して熱間圧延鋼板の品質を格段に向上させることができる。また、従来の冷間圧延製品に相当する板厚が0.9~1.2mm未満の極薄熱間圧延鋼板²⁹⁾、熱間潤滑圧延を適用することによる r 値が3.0を超える超深絞り鋼板³⁰⁾、さらには高機能ステンレス鋼板などの製造を可能とした。熱間圧延に従事する全世界の技術者の長年の夢を実現した。

エンドレス圧延技術の開発は、1980年代中盤から具体的に着手し、モデルによる接合実験から第1熱間圧延工場における実機規模での接合と圧延の実験を経て、1995年千葉製鉄所第3熱間圧延工場において初めて成功した。Fig. 9 にエンドレス圧延を実現するために開発された主要技術³¹⁾を示す。主要技術は以下のとおりである。(1) 5s以下の短時間で先行バー尾端と後行バー先端を接合する接合技術、(2) 接合部の仕上破断を防止するための接合部表面切削技術

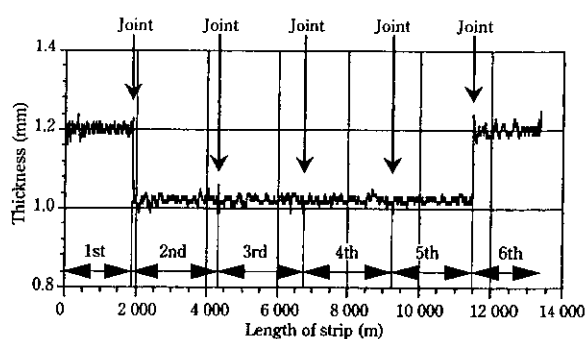


Fig. 10 Strip thickness of endless hot strip rolling measured by X-ray thickness meter at F7 delivery point (strip thickness: 1.2 → 1.0 → → 1.0 → 1.2 mm)

(バリ取り技術)、(3) 自在な板厚を安定に作り込むための高度な仕上張力・形状制御技術と走間板厚変更技術、(4) 速度1150m/minにおいて板を高速切断するストリップシャー技術、(5) 2.0mm以下の板の先端を安定に通板する高速通板技術、(6) 高精度の材料トラッキング予測と実績に基づいて搬送ピッチを制御するミルペーシング技術、(7) 先行材尾端に後行材先端を接合装置の所定位置にジャストインタイムでつぎあわせる高精度追付き制御技術³¹⁾。

Fig. 10 は、エンドレス圧延時の板厚チャートを示す。従来の汎用ミルでは圧延が困難とされていた板厚1.0mmの材料を、1.2mm材に接合し走間板厚変更を行なった圧延例である。この走間板厚変更により、先尾端の非定常部で発生する圧延トラブルを防止するとともに、最終接合材まで $\pm 30\mu\text{m}$ 板厚精度を継続して達成している。走間板厚変更は0.5s以内のごく短時間に行われており、これにともなう板厚変動は見られない。

高精度かつ信頼性の高い完全な自動化技術を基盤として、過去に例のない機械・制御の総合技術として、エンドレス圧延が実現されている。

3.4 熱間圧延仕上ミル最適制御

プロセス制御の手法には、動的な現象を扱う制御理論に基づく方法³²⁾、最適な条件を決定するための各種最適化手法³³⁾、生物の思考過程を模倣したエキスパートシステム・ファジー制御・ニューラルネットワーク手法³⁴⁾がある。川崎製鉄では、連続鋳造や熱間圧延などで制御理論³⁵⁻³⁸⁾、原料処理や熱間圧延などで最適化手法^{39,40)}、高炉や冷間圧延などで人工知能^{41,42)}に基づく制御方法を開発している。以下に、熱間圧延仕上ミル最適制御⁹⁾の例を紹介する (Fig. 11)。

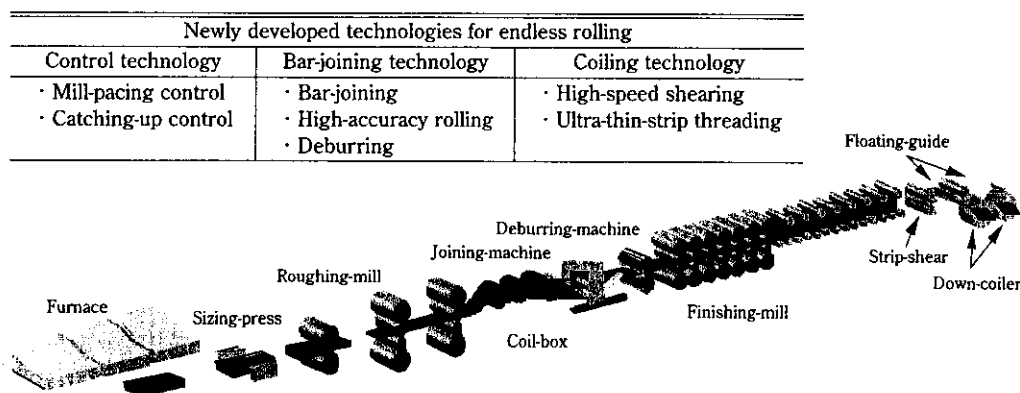


Fig. 9 Layout for endless rolling in Chiba Works No. 3 hot strip mill

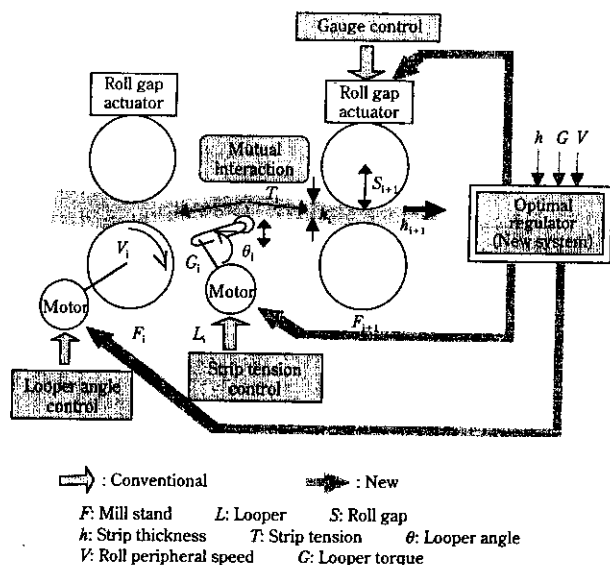


Fig. 11 Outline of the conventional control system and the optimal control

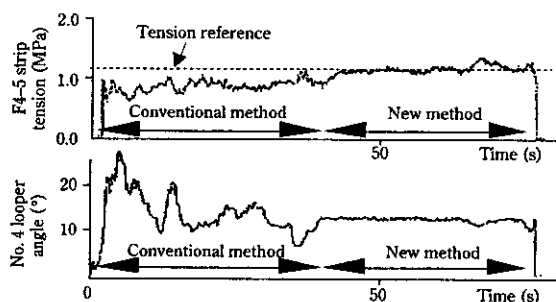


Fig. 12 Result in the actual production mill

従来の熱間圧延仕上ミルでは、板厚を調整する板厚制御系、張力を調整する張力制御系およびスタンド間の速度バランスを調整するルーバ角度制御系をそれぞれ独立に適用していた。張力とルーバ角度と板厚の間には相互干渉が存在し、制御性能を上げるために制御ゲインを大きくすると、系がハンチングするなどの問題があり、十分なまたは満足な制御を実現できなかった。この問題を解決するために、ロールギャップ、ロール速度、ルーバトルクを協調して操作する最適制御系を構成して実機適用した。Fig. 12 に示すよう

に、大幅な制御性能改善が達成でき、従来とほぼ同一制御ゲインでも板厚変動は約 10% 低減した。また、ルーバ高さ、張力は各々約 1/4、1/2 レベルまで飛躍的に変動を低減することができた。

4 今後の展望

日本の鉄鋼業は、国際的大競争、連結決算、顧客によるサプライヤーの選別、地球環境保護、IT の飛躍的発展などの国際的潮流の中で大きな変革の時代に突入しており、企業経営にとって、グループ会社を含めた経営の効率化、資産収益性の最大化が重要な課題になっている。装置産業である鉄鋼業においては、これまで培ってきた設備技術力をグループ全体で共有化し、社会に広く貢献していくことが今後のめざすべき重要な方向と考えられる。

プロセス技術に関しては、地球環境保護、多様化する顧客ニーズへの迅速対応、大競争時代に対応するコストダウンなどを意識した技術開発をさらに強化する必要がある。たとえば、超微細化結晶粒の鋼材製造技術、地球環境に優しい鉄鋼製品の製造技術、廃棄物のリサイクル技術、中低温領域の廃熱回収技術や化学反応を応用したエネルギー回収技術など、地球の未来につながる新技術を開発し実用化することが重要な課題と考えられる。

一方、制御技術・情報技術は、現状最も技術進歩の著しい分野であり、さらなる高速化・大容量化・安価化の進展が期待される。これにより、高度な制御理論やシミュレーション技術、データベース制御などが実用レベルになり、迅速な新製品開発や鉄鋼製造技術の向上への大きな武器となる。

設備管理技術に関しては、保全支援システム、設備診断技術、評価解析技術、新材料開発を含めた長寿命化技術および高能率工事施工技術の高度化によるより効率的な設備管理体制へ飛躍する必要がある。また、IT を活用した遠隔保全や在宅保全が現実のものとなり、保全体制の少数精鋭化、稼働率向上などが期待できる。他方、ベットロボットの出現に見られるように、マイクロマシン技術も小型化や学習能力向上が進み、3K 作業や設備監視業務などへの適用拡大が期待される。

このように、さまざまな分野における急速な技術進歩を踏まえ、それらを有機的に結合することで、製鉄所の運営形態を大きく変革できる可能性を持っており、その動向を正しく見極めながら、新技術や適用技術を研究開発することが重要である。今後、鉄鋼生産の新たな変革に結び付けていくために、顧客の志向する技術動向を的確に把握しながら新技術の開発に積極的に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) T. Morimoto, M. Yoshimoto, T. Matsumoto, and H. Ando: Ironmaking Proc., 41(1982), 132
- 2) 吉川文明, 兒子精祐, 清原庄三, 田口整司: 耐火物, 42(1990)10, 579
- 3) M. Fujita, H. Kojima, H. Marushima, and T. Kawai: Iron and Steel Engineer, (1999), 38
- 4) 井田 傑, 藤田昌男: 材料とプロセス, 8(1995), 1091
- 5) 中戸 参, 相沢完二, 松谷 淳, 佐藤道夫, 高柴信元, 藤井徹也: 川崎製鉄技報, 22(1990)3, 163
- 6) 高柴信元, 岡本浩志, 相沢完二: 川崎製鉄技報, 25(1993)4, 271
- 7) T. Nakagawa, K. Hara, J. Hasunuma, H. Osanai, R. Yamaguchi, and S. Hashimoto: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 80(1997), 307
- 8) 二階堂英幸, 直井孝之, 植木 茂, 藤原煌三, 阿部英夫, 二瓶充雄: 第 38 回塑加速講論, 41
- 9) M. Okada, Y. Iwasaki, K. Murayama, A. Urano, A. Kawano, and H. Shiomi: "Optimal Control System for Hot Strip Finishing Mill", IFAC96, (1996)
- 10) 高木 清, 田中伸治, 堀田悠生, 待留 誠, 中野貞則, 二階堂英幸: 材料とプロセス, 5(1992), 1511
- 11) 紺野洋司, 中野貞則, 高木 清, 田中伸治, 小川正一, 川路泰弘: 材料とプロセス, 11(1998), 992
- 12) 山下陽俊, 八角忠昭, 伊理正人: 川崎製鉄技報, 31(1999)4, 263
- 13) T. Kametani, K. Andachi, N. Nakagawa, H. Shigemoto, T. Yoshioka, and M. Hirata: Proc. of the IFAC Int. Workshop, Korea (1997), 60
- 14) 田野口一郎, 池永孝雄, 村上進次郎: 川崎製鉄技報, 26(1994)1, 39
- 15) T. Seto, H. Hayashi and S. Saitou: 32nd Mechanical Working & Steel Proc. Conf. AIME, October (1990)
- 16) 松本 実, 片山二郎, 穴吹善範, 林 宏之: 材料とプロセス, 11

- (1998), 252
- 17) 狩野 彰、大森和郎、金堂秀範、武田 了：第 46 回塑加連講演，(1995)，383
- 18) 佐藤裕二、新川耕二、瀧本高史、木谷 靖：材料とプロセス，9 (1996)，760
- 19) 荒川周一郎：日本設備管理学会誌，9(1997)3，195
- 20) 福本雅一、中西和之、高木 清、小堀隆雄、荒川周一郎：日本設備管理学会誌，8(1997)4，240-244
- 21) 西島真也：ICEC'98 (第 29 回) 講演集 (1998)，p5-4-1
- 22) 岩田光司、森本照明、金谷 弘、市原 勲、藤田昌男、清原昭三：川崎製鉄技報，15(1983)3，193
- 23) 小島信司、松川敏胤、児玉正範：川崎製鉄技報，12(1980)3，101
- 24) M. Naitou, S. Takata, S. Yuhara, H. Osanai, T. Nakagawa, and S. Nakajima: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 82(1999)，79
- 25) 安川 登、松川敏胤、市原 晃：川崎製鉄技報，28(1996)1，20
- 26) 杉澤元達、小倉 滋、荒谷 誠：川崎製鉄技報，28(1996)1，14
- 27) 小島信司、溝田久和、櫛田宏一：川崎製鉄技報，26(1994)1，1
- 28) 二階堂英幸、磯山 茂、野村信彰、林 寛治、森本和夫、坂本秀夫：川崎製鉄技報，28(1996)4，224-230
- 29) 山田信男、北浜正法、二階堂英幸：川崎製鉄技報，31(1996)3，155-160
- 30) 西村恵次、福井義光、川辺英尚：川崎製鉄技報，31(1999)3，161-164
- 31) 二階堂英幸：日本鉄鋼協会，第 169，170 回西山記念講座 (1998)，79-104
- 32) 藤井克彦：ふえらむ，2(1997)1，37
- 33) 玉置 久：ふえらむ，3(1998)2，101
- 34) 藤井克彦：ふえらむ，2(1997)3，183
- 35) 青木秀未、加地孝行、浅野一哉、若槻祐司、山根 明：「外乱オブザーバを用いた連铸モールド内溶鋼レベル制御」，電気学会産業応用部門全国大会，(1993)
- 36) 若槻祐司、山根 明、飯田 修、大田快人、木村英紀：「連続铸造機モールド溶鋼レベル制御系への H_{∞} 制御の適用」，第 37 回自動制御連合講演会，(1996)
- 37) 浦野 朗、岡田誠康、柳野公治：川崎製鉄技報，31(1999)4，229
- 38) 虎尾 彰、浅野一哉、高田 一：川崎製鉄技報，31(1999)1，82
- 39) 浦野 朗、村山 薫、潮海弘資：川崎製鉄技報，26(1994)1，33
- 40) 岩村忠昭、飯田 修：計装，35(1992)1，24-28
- 41) 牧勇之輔、稲山晶弘、井野勝己：川崎製鉄技報，31(1999)4，216
- 42) 後藤俊二、水島成人、花田真一郎：川崎製鉄技報，28(1996)2，95