

新日鐵住金(株)の最近の厚板製造技術

Progress of Plate Production Technology at Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

野見山 裕 治*
Yuji NOMIYAMA矢 澤 武 男
Takeo YAZAWA安 井 洋 二
Hirotsugu YASUI

抄 録

厚鋼板への要求性能の多様化、厳格化に応えるべく、新日本製鐵(株)、住友金属工業(株)それぞれにおいて、さまざまなプロセス技術開発を行ってきており、経営統合後もシナジー効果を享受しつつ開発を加速している。加熱～圧延・冷却工程では、各工程に応じた最新の数値モデルを構築し、省エネルギー、高歩留、制御精度のレベルアップを図った。TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術も独自の技術を発展させ、広範囲な冷却速度で高精度かつ均一な冷却を実現できる設備導入を行っている。さらに厚板製造プロセスにおける品質管理の高度化、一貫最適化技術の開発も行い、顧客のニーズにタイムリーに対応している。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation have developed various plate manufacturing technologies to meet for the diversified and strict customers' demands. At reheating and rolling / cooling process, the cutting-edge numeric models for each process were developed, contributing to energy-saving, the yield improvement, and raising control accuracy. TMCP (Thermo Mechanical Control Process) was developed accumulating original technologies, and the equipment which can realize uniform cooling with a wide range cooling rate was introduced into the each plate mill. Furthermore, the advancement of quality control and the integrated optimization of steel plate production process for production control have been developed, and we respond timely to customer needs.

1. 緒 言

近年エネルギー需要の増大に伴って、厚鋼板が使用される環境も寒冷地や深海など、より環境の厳しい地域に拡大している。厚鋼板に要求される仕様も、高強度化に加えて、低温靱性や極厚化など、新しいプロセス技術が必要となってきた。また、旺盛な厚板需要を背景に、韓国、中国での厚板ミルの新設、増強も行われており、製造コストの点でもより一層の低減を図る必要性も高まっている。これらのニーズに応えるべく、旧新日本製鐵(株)、旧住友金属工業(株)それぞれにおいて、各製造工程に応じた様々な技術開発を行ってきた。本報では両社で独自に進化させてきたプロセス技術の中でも独自性の強い技術に絞り、その概要について述べる。

2. 加熱制御技術

エネルギー需要の増大に対応すべく、加熱炉の増設等を

行って圧延能力の拡大を図ってきたが、一方で燃料原単位の改善も大きな課題となってきた。この燃料原単位の改善を目的に、自動燃焼制御モデルの開発を行っている²⁾。スラブ温度計算は、2次元熱伝導方程式を用いて、スラブ厚方向×長手方向の2次元と、スラブ厚方向×幅方向の2次元断面を組合せた簡易的な3次元モデルを採用した(図1)。

このスラブ温度計算モデルをベースに、自動燃焼制御モデルを作成した。自動燃焼制御モデルの炉温制御の考え方を図2に示す。装入側の炉温を極力低下させる後段負荷型の温度パターンを選択し、中心温度及び均熱度(スラブ中心温度とスラブ下面温度との差)を中間位置でも考慮しながら炉温を決定し、抽出時のスラブ中心温度を目標値に制御する。図2のSlab jを考える場合、この時点で予測される抽出温度 T_m^0 と狙い抽出温度 T_m^{aim} との誤差、予測均熱度 T_{sc}^0 と狙い均熱度 T_{sc}^{aim} との誤差、及び、中間位置 ($k=3$) での予測温度 T_{mk}^0 と狙い温度 T_{mk}^{aim} との誤差、予測均熱度 T_{sck}^0 と狙い均熱度 T_{sck}^{aim} との差から2加熱帯(2HZ)と均

* 厚板事業部 厚板技術部長 東京都千代田区丸の内 2-6-1 ☎ 100-8071

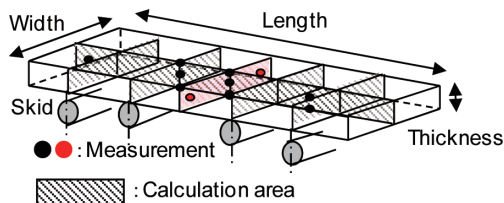


図1 スラブ温度計算の計算対象範囲
Scope of slab temperature calculation

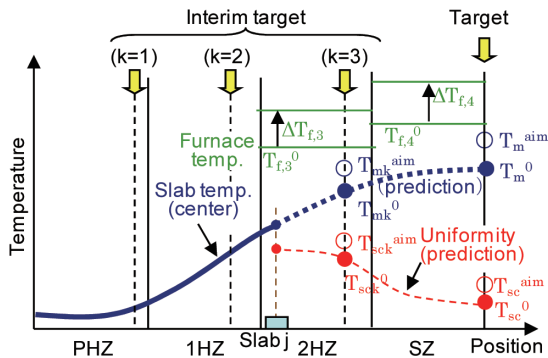


図2 炉温制御の考え方
Concept of furnace temperature control

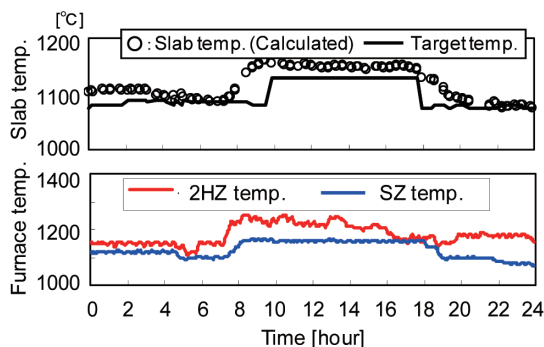


図3 自動燃焼制御モデルの実機適用状況
Application example of automatic combustion control

熱帯 (SZ) の炉温変更量 ($\Delta T_{f,3}$, $\Delta T_{f,4}$) を線形計画法で決定して制御する。

図3に自動燃焼制御モデルの実機適用状況の一例を示す。2HZの炉温を細かく制御することで、焼け不足なく目標温度に制御可能となった。自動制御率も大幅に向上し、従来のオペレータ操炉時の燃料原単位に比べて2.5%の改善が図れた。

3. 高精度圧延制御技術

高強度鋼に代表される高機能厚鋼板では、一般的に合金元素を多く含んだ鋼種にTMCP (Thermo Mechanical Control Process) を適用することが多く、熱間変形抵抗が非常に大きくなるため、パス回数が増大し、板厚や平坦度などの寸法造り込み上の課題も多くなる。また、合金元素を多く含んでいるため鋼材単価も高く、歩留悪化に起因するコスト損失も大きい。本章では、高機能厚鋼板の圧延造

り込み時の対策について検討した事例を紹介する。

3.1 形状制御技術

1960年代に日本で始まった制御圧延 (CR : Controlled Rolling) の普及により、圧延温度の低温化に伴う圧延荷重の増大が顕著となり、ハウジングの損傷などのトラブルが発生するようになった。このトラブルを防止すべく、圧延機はハウジングの増強等を行いながら大型化してきた。さらに、最近ではベアクロス (PC) ミルなどの形状制御ミルの導入も進み、CRの寸法、平坦度の造り込みと高圧下圧延が実現されるようになった。

厚板のパススケジュールの基本的な設定概念図を図4³⁾に示す。手順①で最終製品板厚に狙い板クラウンを与え最終nパスの圧延荷重を決定し、手順②ではこの最終荷重を実現するための圧下量を計算してn-1パスの出側板厚 h_{n-1} を決定し、手順③で平坦度が崩れないように板クラウン比率 (図5) を一定の条件でn-1パスの圧延荷重を決定する。以下手順②と③を繰り返して順次上流パスへ遡ってパススケジュールを決定していく (形状調整パス)。圧延荷重、トルク等圧延機の制約を超えたパスはその制約内で設定する。

厚板圧延で全パス圧下量の大きい高圧下圧延を実現するには、手順①で決める最終パスの板クラウンを適切な値に制御することと、手順③の板クラウン比率を一定に制御する機能が必要であり、これを実現するため圧延中に板クラウンを変更することが可能な形状制御ミルの導入が進んでいる。新日鐵住金(株)も名古屋製鉄所にバックアップロールベンダー (BURB) ⁴⁾ が、君津製鉄所には図6に示すPCミル⁵⁾が導入されている。

図6に示すベアクロスミルは、上下のワークロール (WR)

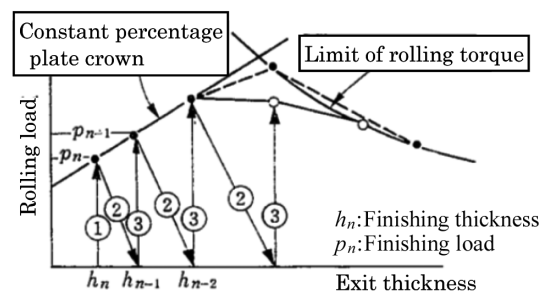


図4 パススケジュール設定の概念図³⁾
Conceptual diagram of pass schedule settings

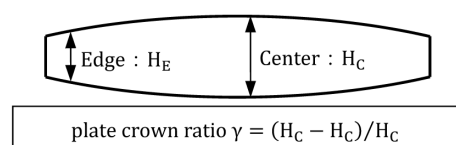


図5 板クラウン比率の定義
Definition of the plate crown ratio

及びバックアップロール (BUR) を圧延方向に対してペアでクロスすることにより板クラウンを制御する方法である。このペアクロスミルにおけるパススケジュールの計算では、最終パスから遡ってパススケジュールを計算する点は従来と同様であるが、形状調整パスの圧延荷重制約を撤廃すべく、ペアクロスミルの大きな板クラウン変更能力を活用して全パス圧下量を増大させ、パス数の削減を図る。ペアクロスミル導入前後のパススケジュールの比較を図7に示す。2～3パスのパス数削減が可能となっており、生産性の向上に貢献しているほか、薄物材等での極端な温度低下も防止可能となり、圧延の安定性にも寄与している。

また、高圧下圧延を利用した材質改善の実現も図っている。図8は、X80 級耐サワーラインパイプ用鋼の強度 - 韌性バランスに及ぼす圧下率の影響を示している。各パス 20% の高圧下圧延を適用することで、X80 として十分な強度及び低温韌性を達成している。

3.2 歩留向上技術

前述したように、高機能厚鋼板は素材コストも比較的高く、歩留向上が製造コスト低減の重要な課題となっている。本節では、厚板特有の歩留向上技術である平面形状制御と幅端部バルジング制御技術について述べる。

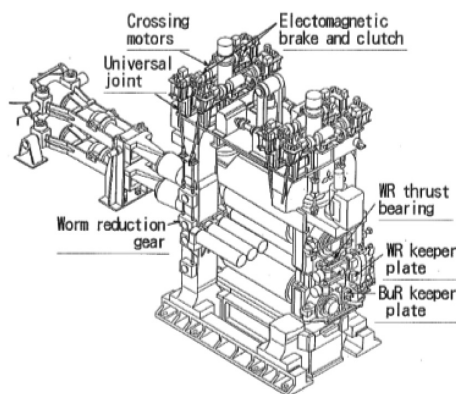


図6 ペアクロス (PC) ミル
General view of the pair cross mill

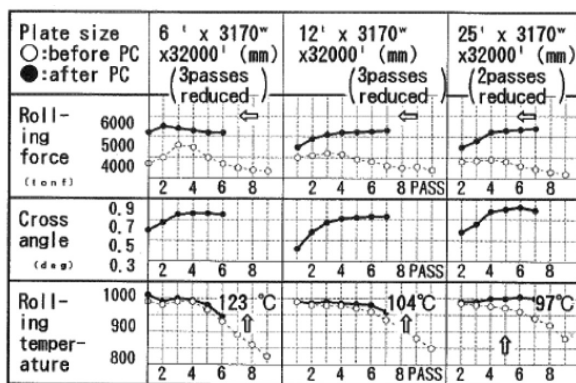


図7 ペアクロス後の高圧下パススケジュール例
Example of reduction in the number of passes

3.2.1 平面形状制御技術

厚板圧延の一般的な工程を図9⁶⁾に示す。銅板を 90° ターンして幅出し圧延を行うことが大きな特徴であり、そのため板幅・平面形状制御が厚板の歩留を大きく左右する重要な技術となっている。

君津製鉄所、大分製鉄所では、DAT (Draft Alteration before Turn) と呼ばれる AGC (Automatic Gauge Control) により長手方向に板厚偏差を付与して平面形状を制御する技術⁷⁾が導入され、最近では更なる精度向上を狙ってアタッチドエッジャーを追設している。

名古屋製鉄所、鹿島製鉄所では、デタッチドエッジャーで平面形状を制御しており、特に鹿島製鉄所では油圧式のエッジャーを導入し、エッジャー圧延中にエッジャー開度を変更することで、通常のエッジングで問題となる幅落ちを減少させるショートストロークエッジャーの技術を導入している。ショートストロークエッジャーの原理を図10に示す。仕上げエッジング中に先後端を軽圧下とすることで、先後端に発生する幅落ちを小さくして歩留の改善を図ろうとする方法である^{8,9)}。図11はショートストロークエッジャーを適用した効果を示している。従来の一一定圧下のエッジャー法に比較して幅落ち、クロップ長ともに低減しており歩留向上が図れている。

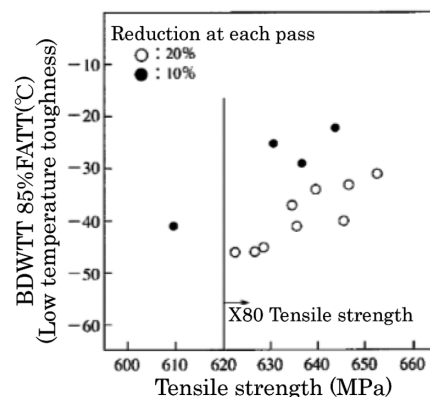


図8 強度 - 韌性バランスに及ぼす高圧下圧延の効果 (X80)
Effects of heavy reduction on the balance of strength and low temperature toughness

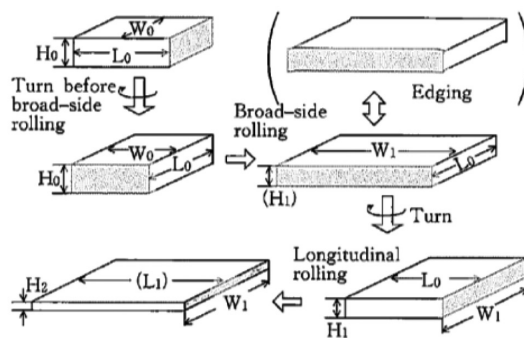


図9 厚板圧延基本パターン⁶⁾
Basic pattern of plate rolling

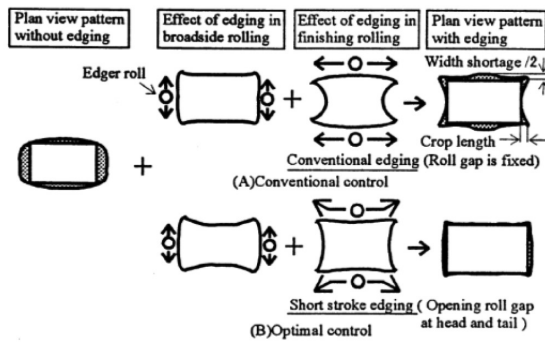


図10 ショートストロークエッジャーの原理⁹⁾
Principle of short stroke edger

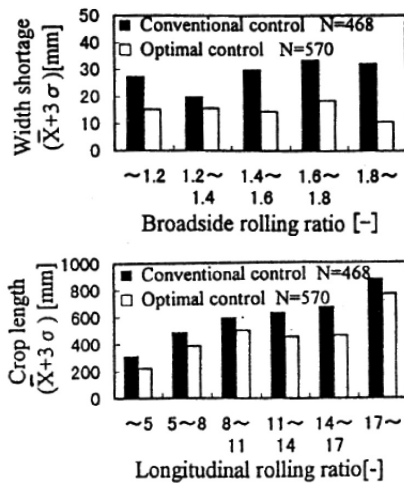


図11 ショートストロークエッジャーの適用例⁹⁾
Application example of short stroke edger

3.2.2 幅端部バルジング形状予測・低減技術

高強度鋼のようにパス回数が増えると、図12に示すようなダブルバルジ形状が大きく成長し、幅歩留が低下する原因となる。このダブルバルジ発生挙動の解明を目的に、バルジング形状予測モデルの検討も行われている¹⁰⁻¹³⁾。表1は圧延過程でのダブルバルジ形状の成長挙動をまとめたものである。板厚が厚く、圧下率が小さい条件ほど、また圧延中の後端部で大きなダブルバルジが発生する。すなわち、比較的厚い段階で行われる幅出し圧延の先後端でダブルバルジ形状が大きく成長することがわかる。特に高機能厚鋼板のような高強度鋼の場合には熱間変形抵抗が高いゆえに軽圧下になり易く、より大きなダブルバルジが成長することになる。

FEM解析で得られるバルジング形状の一例を図13に示す。次式で示す4次曲線で精度良く近似可能である。

$$y(x) = ax^4 + bx^2 \quad (1)$$

ここで、 x は板厚中心からの距離を(板厚/2)で除して無次元化したもの、 y は板厚中心部を0とした時の位置 x におけるバルジング量を示し、 a, b は係数である。係数 a, b は、図13に示すパラメータ $\delta W_m, \delta W_s, D_m$ から求めることができる。

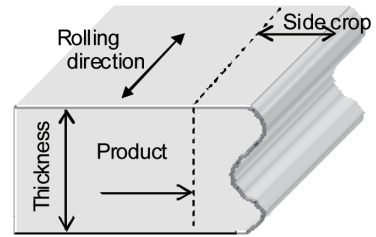


図12 ダブルバルジ形状の模式図¹⁰⁾
Schematic diagram of double bulge shape

表1 バルジング形状に及ぼす圧延条件の影響
Influence of rolling conditions on the bulging shape

Double bulge	Small	Large	
Thickness	Thin	Thick	
Reduction	Heavy	Light	
WR Diameter	Large	Small	
Deforming objects	Front	Edge	Tail

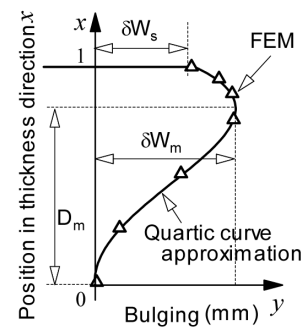


図13 バルジング形状を定義するパラメータ¹⁰⁾
Parameter to define the bulge shape

$$\begin{cases} a = \frac{\delta W_m D_m^2 - \delta W_s}{D_m^2 (1 - D_m^2)} \\ b = \frac{\delta W_m - D_m^4 \delta W_s}{D_m^2 (1 - D_m^2)} \end{cases} \quad (2)$$

また、このバルジング形状を決定するパラメータ $\delta W_m, \delta W_s, D_m$ は次式に示す圧延パラメータ ψ を用いて整理できる。

$$\psi = \frac{\ell_d}{H_i} = \frac{\sqrt{R \cdot (H_i - H_o)}}{H_i} = \frac{\sqrt{R \cdot \Delta H}}{H_i} \quad (3)$$

ここで、 ℓ_d は接触弧長、 H_i は入側板厚、 H_o は出側板厚、 ΔH は圧下量、 R はWR半径である。

1パス圧延の圧延条件を種々変更したFEM解析を行い、得られた幅端部のバルジング形状に対して $\delta W_m, \delta W_s, D_m$ を求め、上述した圧延パラメータ ψ で整理した結果を図14に示す。この結果から $\psi=1.0$ を境に回帰式を作成し、バルジング形状予測式を定式化している。先端部、後端部に発生するバルジング形状に関しても上記と同様の方法にて定式化がされている¹¹⁾。

エッジャー設備を有するミルでは、エッジングによるバルジング形状の変化も予測する必要がある¹²⁾。図15は実

験室実験からエッジャー圧延後のダブルバルジ残存量を調査した結果であるが、ダブルバルジ残存量は断面積減少比 $V_R \times D_m$ をパラメータとして整理可能である。図 15 の結果から断面積減少比が 1.0, すなわちダブルバルジ発生量と同じ量のエッジングを行っても、ダブルバルジ残存比が 1.0 に到達しないことが分かり、エッジャーで完全にダブルバルジ形状を消滅させるには 1.5 倍以上のエッジング量が必要ことが分かる。

以上から、圧延、エッジャーでのバルジング形状の予測を行うことが可能となったため、ダブルバルジ形状が大きく成長する硬質材に対して、エッジング量上昇によるダブルバルジ低減テストを実施し、その効果を実証している（図 16）。ただし、ダブルバルジ低減のためにエッジャー条件を変更すると上述した平面形状が変化するため、ダブルバルジ低減と平面形状制御を両立した最適操業条件の明確化が今後の課題となる。

3.3 異形鋼板製造技術

製品厚や製品幅の異なるプレートを同一スラブに抱き合わせてスラブ単重の向上を図る目的で、圧延途中で仕上厚

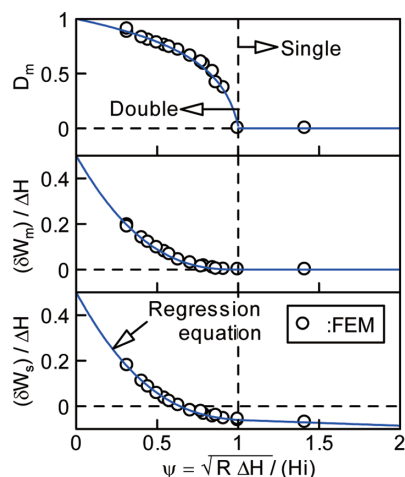


図 14 FEM 解析によるバルジング形状予測式¹⁰⁾
Predictive equation of bulge shape by FEM analysis

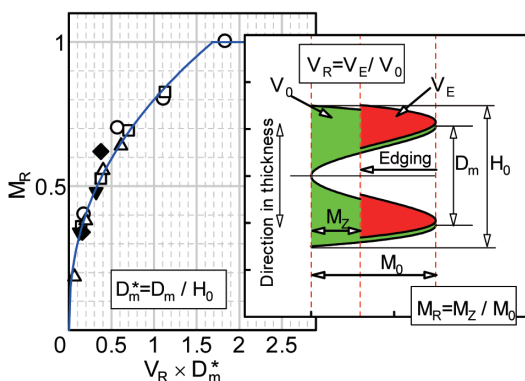


図 15 エッジャー圧延でのバルジング形状変化予測式¹²⁾
Predictive equation for changes of the bulge shape at the edger rolling

や圧延幅を変更する異厚異幅圧延も実用化されている。

また、造船業界を中心に溶接工程の省略や構造物の軽量化を目的として、長手方向に板厚を変化させた差厚鋼板や LP (Longitudinally Profiled) 鋼板も実用化されている。差厚鋼板の製造方法は異厚鋼板と同様であり、LP 鋼板は圧延途中で徐々に板厚を変更させながら目的とするテーパ形状に造り込んでいく。新日鐵住金でも図 17¹⁴⁾ に示すように様々な形状の異形鋼板の製造が可能となっている。

差厚鋼板の圧延方法を図 18¹⁵⁾ に示す。差厚量に応じていくつかの方法がある。差厚量が小さい場合には Type 1 で圧延され、差厚量が大きくなるに従い Type 2, 3 の方式が採用される。LP 鋼板は、鋼板長手位置をトラッキングしながらロール開度をコントロールすることにより、任意の長手方向板厚分布を精度良く付与する。絶対値 AGC を適用して、圧下率変化から生じる荷重変動に応じて出側のゲージ厚を計算し目標とするテーパ形状に制御する。

せん断工程では製品採取位置が適切な位置からずれると大きな板厚の誤差につながるため、オフラインでガス切断

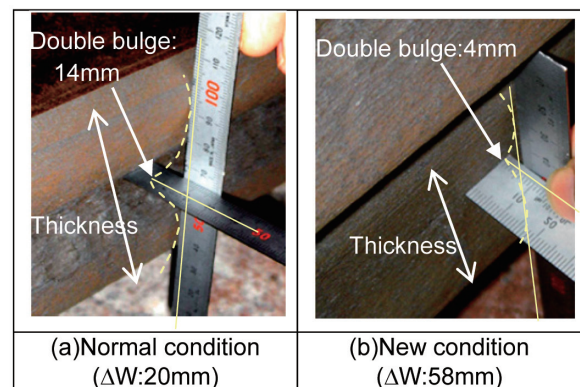


図 16 エッジャー圧延を活用したバルジング低減テスト結果¹³⁾
Change of the bulging shape under the different edger condition

Plate shape	Name
	Lengthwise differential-thickness plate
	Lengthwise multi differential thickness plate
	Lengthwise-tapered plate
	Widthwise-tapered plate
	Cyclic-differential-thickness plate

図 17 異形鋼板の種類¹⁴⁾
Type of the special shaped steel plate

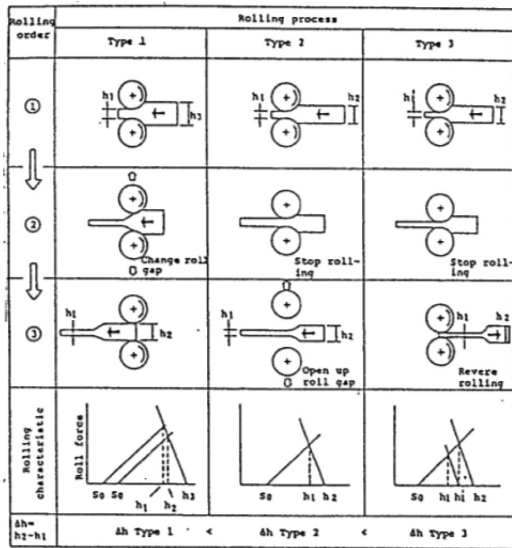


図 18 差厚鋼板の圧延方法¹⁵⁾
Rolling method for the twin gauge plate

を行っていたが、最近ではレーザー厚み計などの高精度板厚計を用いたオンライン切断が可能となっている。

3.4 スケジュールフリー圧延技術

板幅が1mから5mまで大きく変動する厚板圧延では、摩耗やヒートクラウンによるWRプロファイル変化に起因する板クラウンや平坦度の悪化を抑制するために、幅広材から狭幅材の順に圧延するコフィンスケジュールによって圧延順を組む。しかしながら、高機能厚鋼板は少ロットの場合が多くまた加熱温度も一般材と異なり、さらに製品徐冷を伴うことも多いため、コフィンスケジュールを守って圧延順を設計すると、1チャンス当りのロール圧延量減少や、ホットチャージ材の加熱炉挿入温度低下等の問題が発生する。そのため、幅制約の無いスケジュールフリー圧延技術の導入も進んでいる(図19)。

鹿島製鉄所では、アブレーシブジェット方式のオンラインロール研削装置を開発¹⁶⁾し、スケジュールフリー圧延を実現した。アブレーシブジェット方式とは、高圧水に粉体の研磨剤を混入してWRに吹き付けることにより研削を行うものである。図20に、開発した研削用ノズルの構造を示す。配管閉塞を防止するため、高圧水と研磨剤を別々に輸送して、吹き付けの直前に混合させる方式を採用している。

本ノズルを鹿島製鉄所厚板工場の仕上ミルに組み込み、研削した事例を図21に示す。研削は、予測したロール摩耗プロファイルに対して、摩耗段差を除去すべく行う。圧延完了後にプロファイルを実測した結果、ほぼ摩耗段差が解消されることが確認できた。本装置を用いることにより、圧延チャンスの拡大が可能となり、ロール組み換え頻度を半減させ、稼働率の向上に寄与させた。

他方、オンラインロールグラインダー(ORG)を設置して、

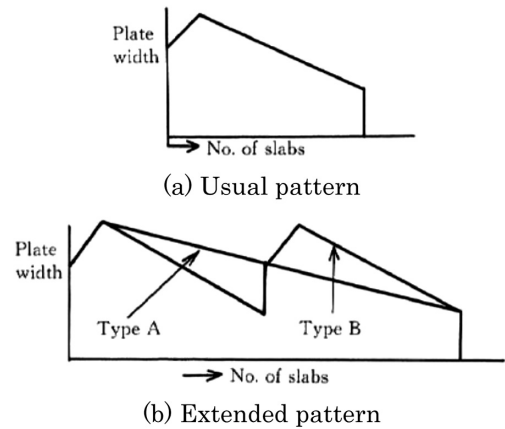


図 19 圧延幅パターン変化の一例
Example of rolling width change in some rolling patterns

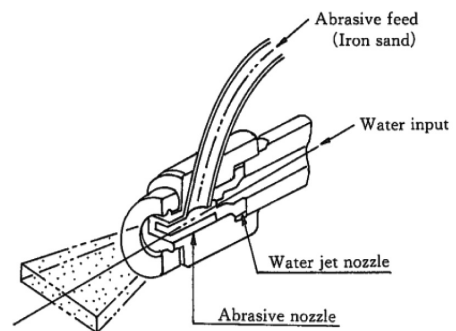


図 20 研削用ノズルの構造
Construction of nozzle

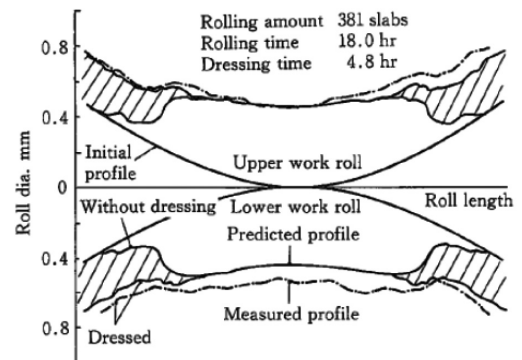


図 21 ロールプロファイル改善の一例
Example of roll profile improvement

圧延で生じたロールエッジ部の摩耗段差を研削除去することでロール摩耗対策を行う方式を大分製鉄所に導入している¹⁷⁾。大分製鉄所仕上圧延機に導入したORGの概要を図22¹⁷⁾に示す。圧延機後面のフレーム上に上下それぞれのWRに対し2台の研削ヘッドを設置し、砥石には寿命延長を目的として平面型研削ホイール構造を採用している。厚板圧延は短尺・間欠圧延であるためメタルイン中の研削は困難であり、スラブ間、または、幅出し圧延後のスラブターン時間を利用して研削が行われる(図23)。

図24にORG導入前後の圧延幅順のパターンを示す。ORGによるロールプロファイル確保により、スケジュールフ

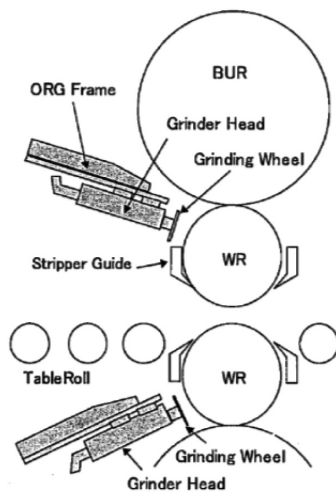


図22 厚板ORGの概要¹⁷⁾
Overview of ORG for Oita Works plate mill

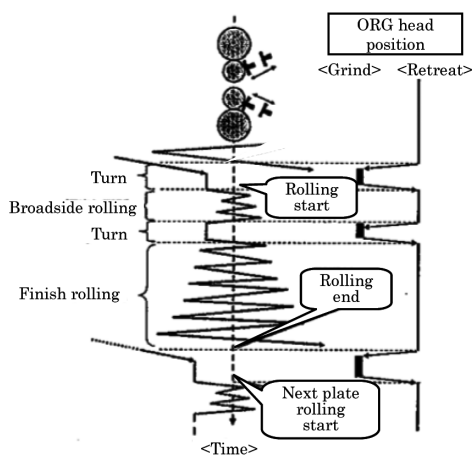


図23 厚板ORGの研削タイミング
Grinding timing of ORG

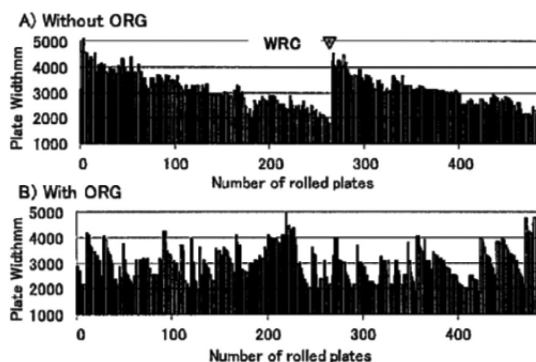


図24 大分製鉄所ORGによるスケジュールフリー圧延
Comparison of rolling schedules

リー圧延を実現している。同時に、1チャンス当たりの圧延量を2500tonから10000tonに拡大し、WR組み換え回数減による作業率の改善、WR原単位改善、ホットチャージ温度の向上等の効果が得られている。

4. TMCP技術

現在の厚板操業において、加熱、圧延及びその後の冷却

速度をオンラインでコントロールすることによって、鋼材の強度、靱性や溶接性を向上させるTMCPが一般的となっているが、その技術の多くが日本を中心に開発されてきた。新日鐵住金も独自にTMCP技術を発展させてきている。まず、初期のTMCPとして、1975年に鹿島製鉄所にSHT (Sumitomo High Toughness Process) 法¹⁸⁾が導入された。これは変態点以下への冷却と適正な温度への再加熱、圧延によってオンラインで組織を造り込むユニークな方法であったが、再加熱、圧延という工程増が高生産のニーズに合わず、現在では行われていない。

代わって、オンラインの加速冷却のみで組織を造り込む技術が開発され、1979年にオンラインのDQ (Direct Quench: 直接焼入れ) 設備が鹿島製鉄所に導入され、1983年には、現在の加速冷却装置の原型となる設備が鹿島製鉄所、君津製鉄所に導入された。加速冷却装置の呼称も独自に設定しており、旧新日本製鐵系ではCLC (Continuous on-Line Control Process)、旧住友金属工業ではDAC (Dynamic Accelerated Cooling Process) と称している。

CLCは、冷却前形状矯正と拘束冷却方式を採用している点が特徴で、2005年にはCLCをベースに、弱冷却でも均一冷却できるノズルを新たに開発し、広範囲な冷却速度で均一な冷却を実現可能な設備CLC- μ ¹⁹⁾が君津製鉄所に導入された(図25)。

DACに関しては、2010年に海外の多くの厚板ミルで導入実績を誇っている外国製の加速冷却装置MULPICに、新日鐵住金が独自に開発した高精度な冷却モデル^{20,21)}を組み込んだDAC-n(図26)に更新し、均一冷却・冷却停止



図25 CLC- μ の外観
Outline of CLC- μ



図26 DAC-nの外観
Outline of DAC-n

温度の向上を実現した。

いずれの装置も X100 以上の超高強度ラインパイプ母材、厚肉耐サワーラインパイプ母材、海洋構造物、ペンストック、LNG タンク用高 Ni 鋼をはじめとするハイエンド厚鋼板の安定量産体制確立に大きく貢献している。

5. 冷間矯正技術

鋼構造物の加工、組み立ての自動化、低コスト化などに伴い、厚板製品の加工後を含めた形状品質への要求はますます厳格化している。また、前節で述べた TMCP を適用した場合には平坦度が崩れるリスクも高く、ユーザーニーズの厳格化と TMCP 技術の適用拡大に伴う平坦矯正の要求に応えるべく、君津製鉄所、名古屋製鉄所に矯正荷重 5000ton の冷間レバラーを導入し、2012 年には鹿島製鉄所に 7000ton の大型冷間レバラーを導入した。

また、大分製鉄所に導入した矯正装置：OPL (Oita Plate Leveler)^{22,23)} は曲げではなく、0.2%程度の極軽圧下により鋼板形状を矯正する。圧延中に、圧延機自身が荷重分布からロールバイト内の鋼板形状を知覚し制御する特性から、知能圧延機と呼称されている。補強ロール (BUR) としては胴長の短いロールを軸方向に並べた分割 BUR 形式を採用し、各 BUR の支持部の相互干渉を避けるため、圧延機の入側と出側に交互に分割 BUR を配置して作業ロール (WR) のほぼ全胴長を BUR で支持する構造としている。OPL の場合、分割 BUR は入側に 9 個、出側に 10 個がクラスター角 41°で配置されている。各分割 BUR には WR ~ BUR 間に作用する荷重分布を測定するため、それぞれ独立にロードセルが配備されている。さらに形状制御のためのアクチュエータとして各分割 BUR には独立に位置制御機構を設けている。

以上のような構造の圧延機で、1) 分割 BUR のロードセル出力より WR ~ BUR 間荷重分布を測定し、2) これより圧延材 ~ WR 間の圧延荷重分布を推定し、3) この圧延荷重分布がほぼ均一となるようにリアルタイムで位置制御を行っている。

6. 生産計画

中国を中心とした厚板製品の供給過剰構造下において、一定規模の数量を確保しつつマージンを維持、拡大していくためには、コスト改善のみならず、商品対応力、一貫でのソリューション提案力ならびに工期対応力 (短工期対応、荷揃達成率) などの非価格競争力の強化が必要不可欠である。本章では工期対応力強化に向けたこれまでの取組みについて述べる。

汎用からハイグレードへの品種高度化を営業戦略的に推進している昨今では、注文の精整工程通過率は増加し、一貫でのボトルネック工程は圧延工程に留まらず複数の精整工程に及ぶ。荷揃達成率を高位に維持しつつ各工程の機損

のミニマイズ (= 限界利益の最大化) を成し遂げるため、期、月次計画における投入量の適正化と週、日次計画における流し込みの適正化に向けた技術開発を推進してきた。

6.1 標準工期算出技術の開発²⁴⁾

製造工期は精整工程の通過パターンとの相関が強いことから、操業実績データに基づいて各注文の工程パターンを求める決定木を構築した (図 27)。これに同じく操業実績データに基づいた工程毎の工期 (平均工期 μ_j 、工期標準偏差 σ_j) を算入することで通過パターン (i) 毎の工期 (平均工期 $\tilde{\mu}_i$ 、工期標準偏差 $\tilde{\sigma}_i$) を予測するモデルを構築した (図 28、式 (4))。これに注文投入実務者の業務支援ツールを加えることで、期、月次計画における注文投入量を最適化し、本技術により荷揃達成率を高位に安定化させるとともに、製造工期を平均で 1~3 日短縮する効果が得られた。

$$\tilde{\mu}_i = \sum_j p_{ij} \mu_j, \quad \tilde{\sigma}_i^2 = \sum_j p_{ij} \sigma_j^2 \quad (4)$$

p_{ij} : 通過パターン i の工程 j 通過有無

μ_j : 工程 j の平均工期

σ_j : 工程 j の工期標準偏差

6.2 出鋼計画最適化技術の開発²⁵⁾

前述の技術によりマクロ的に (期、月次単位で) は平準化された注文を、週、日次の実製造計画でも維持しつつ、さらには出鋼ロットを最大化する出鋼計画最適化技術も合

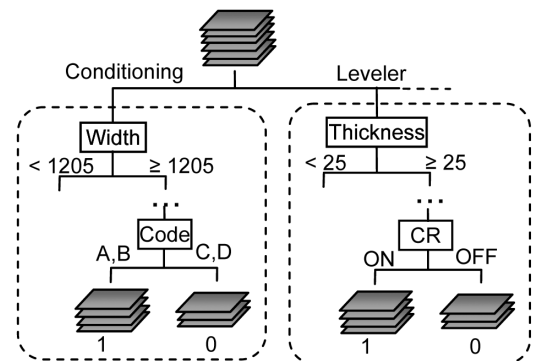


図 27 通過工程を予測する決定木
Decision trees for process flow prediction

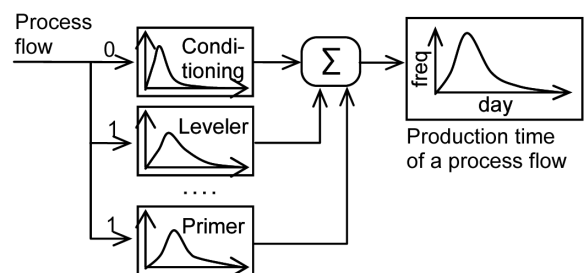


図 28 工期分布の予測方法
Production time prediction diagram

表2 性能評価結果(人による立案:100%)
System performance (human plan: 100%)

Order quantity	Charge/Lot	Delay in casting	Excess load amount
Normal case	120%	32%	0.2%
Busy case	114%	75%	0.2%

せて開発している。鋼種、通過パターン毎のグループに対して、生産能力等の制約条件の下で出鋼ロット、出鋼期限日そして精整負荷平準化の評価値(式(5))が最大となるように混合整数計画法を用いて出鋼重量を決定するものである。

[最適化問題]

$$\text{評価関数 } J = W_1 J_1 + W_2 J_2 + W_3 J_3 \quad (5)$$

$J_1 = \sum_i \sum_t \delta_{it}$: 異鋼種継目数

$J_2 = \sum_j \sum_p \left| \sum_{t=0}^p \hat{x}_{j,t} - \sum_{t=0}^p x_{j,t} \right|$: 納期遅れ

$J_3 = \sum_k \sum_t \left| \hat{y}_{k,t} - y_{k,t} \right|$: 精整処理能力超過量

W_1, W_2, W_3 : 重み係数

$\hat{x}_{j,t}$: 注文 j , 出鋼期限日 t の注文量

$x_{j,t}$: 注文 j , 出鋼期限日 t の出鋼量

δ_{it} : 鋼種 i の期限日出鋼有無 (0-1 変数)

$y_{k,t} = \sum_j f_k(\cdot) x_{j,t}$: 工程 k , 出鋼日 t の精整発生量

$f_k(\cdot)$: 製造仕様から工程 k の発生率を予測する関数

制約式として製鋼制約, 精整置き場制約などを付与

その結果, 注文量が定常状態のケースでは精整負荷を平準化しつつ, チャージ/鋼種を 20% 向上し, 出鋼期限日遅れも 32% にまで改善する効果が得られている(表2)。

7. 品質管理高度化技術

多種多様なサイズ, 仕様に対して, 的確に製造し, 顧客に配送する品質 Identity (ID) 管理技術は, ユーザーの信頼度向上に不可欠である。一方, 前述したようにユーザーからの要求の多様性は益々広がり, 加えて職場での世代交代が進行する中, ID 管理を着実に実行することが困難になりつつある。そこで, ICT (Information Communication Technology) による ID 管理システムを構築し, ユーザー信頼度の向上及び精整工程生産性向上を実現している²⁶⁾。ICT 技術は, PDA (Personal Digital Assistance) を基軸に, デジタルマイクロメータ, データ通信装置, 音声認識装置を配置するシステム構成となっている(図29)。

この ID 管理技術の導入により, 確実な ID 保証体制を確立した上で, 精整工程の作業時間も従来の 1/2 に短縮する効果を得ている。

8. 結 言

以上述べてきたように, 様々な製造プロセス技術の進歩により, 多岐に亘る分野の高機能厚鋼板の製造が可能となっている。新日鐵住金も, 高機能厚鋼板をさらに安価

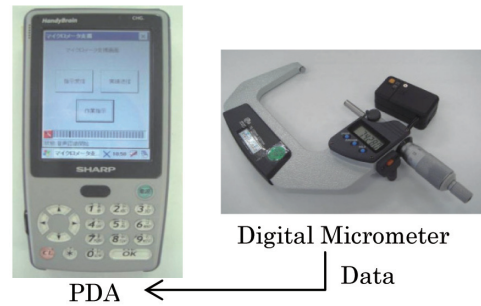


図29 PDA 端末とデジタルマイクロメータ
PDA and digital micrometer

に, 簡単に, 安定して製造する努力を続けることに加えて, X80 の耐サワー鋼や低温靱性に優れる大入熱溶接用鋼など, 複数のハイエンド機能を組合せた更なる高機能商品の開発に力を入れていく必要がある。

そのための主要な製造課題としては,

- ① 緩冷却から強冷却まで安定して平坦度確保が可能な TMCP 技術の更なる進化
- ② 製鋼からの一貫した材料の造り込み・・・表面性状, 内質に優れたスラブ casting 技術
- ③ 高機能厚鋼板の安価製造技術(究極の歩留達成を実現する高精度圧延・均一冷却技術)
- ④ ユーザーにタイムリーに製品を納入する最適生産管理システム

等が挙げられる。

いずれの課題も一朝一夕に改善される課題ではないが, これまでに培ってきた技術を土台に技術開発のスピードを早め, より高度化する顧客のニーズに的確に応えていく所存である。

参照文献

- 1) 矢澤武男: 第 207 回西山記念技術講座. 2011
- 2) 北和昭, 中川繁政, 小林俊介, 児嶋次郎, 矢澤武男, 若松弘宜, 河野美智雄, 城島健一郎: CAMP-ISIJ. 1051 (2010)
- 3) 横井玉雄, 美坂佳助: 塑性と加工. 16 (168), 10 (1975)
- 4) 高谷周一, 高町恭行, 小川茂: 第 110 回圧延理論部会
- 5) 西岡潔, 水谷泰, 堀裕二, 児嶋明彦, 小川茂: 新日鉄技報. (365), 9 (1997)
- 6) 和田凡平, 古川裕之: 住友金属. 50 (1), 79 (1998)
- 7) 大力修, 間淵秀里, 出川一郎, 中村秀夫: 製鉄研究. (326), 70 (1987)
- 8) Furukawa, H., Ueda, I., Otake, K., Sakamoto, N.: Proc. of the 7th International Conference on Steel Rolling. 1998, p. 583
- 9) 古川裕之, 上田一郎, 坂本憲昭, 岡田淳司, 大竹幸一: CAMP-ISIJ. 9, 1027 (1996)
- 10) 矢澤武男, 福島傑浩, 芝原隆, 鈴木利哉: 第 56 回塑性加工連合講演会論文集. 2005, p. 491
- 11) 矢澤武男, 福島傑浩, 一柳安正, 小林誠: 平成 18 年塑性加

- 工春期講演会論文集. 2006, p. 29
- 12) 矢澤武男, 福島傑浩, 一柳安正, 小瀬川淳: 第 57 回塑性加工連合講演会論文集. 2006, p. 225
- 13) 矢澤武男, 福島傑浩, 一柳安正, 小瀬川淳: 第 58 回塑性加工連合講演会論文集. 2007, p. 127
- 14) 鶴茂則, 西岡潔, 野見山裕治: 新日鉄技報. (365), 3 (1997)
- 15) 若月邦彦: 第 118 回塑性加工懇談会. 1994
- 16) 大竹幸一, 坂本浩一, 新田征也, 一柳安正, 橘俊作: 住友金属. 50 (1), 88 (1998)
- 17) 本田貴之, 中野鉄也, 山元章弘, 加賀慎一: CAMP-ISIJ. 18, 423 (2005)
- 18) 池島俊雄: 鉄と鋼. 65 (10), 1644 (1979)
- 19) Nippon Steel Monthly. 2006.11
- 20) 中川繁政, 橘久好, 角谷泰則, 原口洋一, 小林一暁, 中村修, 児嶋次郎, 磯部現, 矢澤武男: 計測自動制御学会論文集. 50 (6), 487 (2014)
- 21) 角谷泰則, 中川繁政, 橘久好, 児嶋次郎, 中野孝一, 磯部現, 矢澤武男: 計測自動制御学会論文集. 50 (7), 528 (2014)
- 22) 小川茂, 山田健二, 白石利幸, 大塚貴之, 佐田野豊, 宇津久隆, 若月邦彦, 山村和人, 四阿佳昭, 空尾謙嗣, 星野毅夫, 竹下幸一郎, 池田佳士朗, 林寛治, 佐古彰, 松田裕, 池本裕二, 古元秀昭: CAMP-ISIJ. 23, 658 (2010)
- 23) 若月邦彦, 竹下幸一郎, 池田佳士朗, 小川茂, 山田健二, 大塚貴之, 佐田野豊, 宇津久隆, 四阿佳昭, 空尾謙嗣, 池本裕二: 平成 21 年塑性加工春期講演会論文集. 2009, p. 379
- 24) 塩谷政典, 森純一, 伊藤邦春, 水谷泰, 鳥飼健司: CAMP-ISIJ. 26, 238 (2013)
- 25) 森純一, 伊藤邦春, 水谷泰, 鳥飼健司, 千崎信, 屋地靖人, 塩谷政典: CAMP-ISIJ. 25, 355 (2012)
- 26) 山下英隆: システム制御情報学会. 52 (4), 126 (2008)



野見山裕治 Yuji NOMIYAMA
厚板事業部 厚板技術部長
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



安井洋二 Hirotsugu YASUI
厚板事業部 厚板技術部 厚板技術室 主幹



矢澤武男 Takeo YAZAWA
厚板事業部 厚板技術部 厚板技術室長