

© 1988 ISIJ

技術報告

スケジュールフリー圧延技術を駆使した
新世代連鑄-熱延直結プロセス浅村 峻*・伊藤洋二*²・薮田俊樹*²・猪井善生*²
赤時 恵*²・小田高士*²・田中正二*²A Universal Continuous Caster-Hot Strip Mill Direct Rolling
Process by Effective Utilization of the Unique Schedule Free
Rolling Operation SystemTakashi ASAMURA, Yoji ITOH, Toshiki YABUTA, Yoshio INOI,
Megumi AKAJI, Takashi ODA and Shoji TANAKA

Synopsis :

A new 66-in. Yawata hot strip mill put into operation in Apr. 1982 and the total production amounted to 17 million tons at the end of June 1987. In this mill, up-to-date equipments, such as the 6Hi mill, work-roll shift device, etc. and large scale computer control system were introduced. This SFR operation has been established by a lot of developments about the unique softwares, such as the work-roll shift system, automatic crown and flatness control system, the resistance to deformation model employing the dislocation theory, forward slip measuring system, specialized operation of the reheating furnaces, etc. As a result, the coupled and synchronized operation between continuous caster and hot strip mill has been carried out successfully, so-called hot charged rolling (HCR), which has brought not only to the cost reduction but also to the market need without production shortage. This epoch-making SFR operation has surely changed the image of hot strip mill operation. And, an advanced and lay-out free direct rolling (CC-HDR) operation started-up in June 1987.

Key words : rolling ; continuous casting ; direct reduction ; process control ; production control ; measurement ; plastic deformation ; energy ; fuel ; computer.

1. 緒 言

高度成長期の鉄鋼製造技術は、少品種・大量生産を指向して品質を高めつつ、コスト低減と生産性向上を図ってきた。特にホットストリップミル（以下熱延と略記）においては、品質維持と生産性確保の観点から同種の素材をまとめ、板厚・板幅に関する一定の圧延順序、いわゆるコフィン型スケジュール制約に基づいて操業することが不可欠であり、効率的であるとされてきた。しかし安定成長期に入った今日、鉄鋼においてもニーズが多様化し、高品質化が要求される時代にある。これら市場要求に即応し、かつ、国際競争力堅持のための、いつそうのコスト低減と品質向上を図ることのできる体制づくりが大きな課題となってきた。

八幡製鉄所・熱延工場は昭和 57 年 4 月の稼働以来、スケジュールフリー圧延技術（以下 SFR と略記）確立に取り組み、数々の新要素技術の開発を重ね、昭和 60 年には圧延幅逆転フリー技術を確立した¹⁾。その結果、異鋼種混合、熱片・冷片の加熱炉使い分けが自在となり、大幅な省エネルギーと同時に、高品質の熱延コイル製造技術が確立でき、従来の熱延操業のイメージを一新する、新世代熱延ミルの操業を実現した^{2)~4)}。

連鑄-熱延直結・連動操業も当初の加熱炉へのダイレクト・ホットチャージ (DHCR) 操業で大きな成果を挙げ、さらに、より効率化を図る目的で、昭和 62 年 6 月より既設の連鑄-熱延設備での CC-HDR 操業を開始し、効果を発揮している。

昭和 62 年 10 月 15 日受付 (Received Oct. 15, 1987)

* 新日本製鉄(株)薄板技術部 (Sheat and Coil Technical Div., Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

2. 熱延ミルにおける SFR 技術の背景と概要

熱延は、一貫製鉄所粗鋼生産の約 2/3 を処理する中核ミルと位置づけられている。八幡の熱延ミルは、多くの連鑄機と分塊から材料を受け入れ、一方で、冷延をはじめとする、多岐にわたる次工程からの供給要請にしたがつて、要求どおりの品質をもつ製品ホットコイルを整然と供給する立場にある。このような中であつて、熱延においても、特殊鋼比率の増加、小ロット化など、高級化・多様化が急速に進展し、これら要請に対する即応力強化が迫られている。SFR 技術とは、従来のコフィン型スケジュール遵守から脱却し、順序立てのための時間的・品質的制約をなくし、要請に応じていつでも圧延できるようにするもので、このことによつて市場要請への適用力が高まり、かつ、強いコスト競争力を持つ高効率な製造体制が確立することになる。

SFR を実現するためには、次の五つの要素技術を開発・確立する必要がある。

- ① 圧延ロールの摩耗均一化・軽減化技術
- ② 製品の平坦度・クラウンの同時制御技術
- ③ 高精度製品圧延技術
- ④ 総合的計算機適用技術
- ⑤ 生産工程管理技術

①～③の各技術は、従来の圧延技術の壁を打破する技術であり、④⑤は前3技術を総合的、効果的に活用するための総合技術である。

3. SFR を支える要素技術

3.1 圧延ロールの摩耗均一化・軽減化技術

圧延材幅方向エッジ部の温度は中央部より低いこと、幅方向メタルフローがエッジ部で大きいことから、圧延材エッジ部と接触するロール表面が局部的に摩耗する。このための一つの解決策として、幅広から幅狭へと圧延することによつて、摩耗の分散を図ってきた。

このための対策として、ワークロール・シフト機構を開発・適用した¹⁾。この技術は、上下ワークロールを軸方向にシフトして局部摩耗を分散することにある。この効果をいつそう高めるため、個々のロールの摩耗均一化に加え、上下ロール間ギャップに着目し、その均一化を図る最適ロールシフト法を開発した³⁾⁴⁾。その基本ロジックは以下のとおりである。

(1)ステップ1

ロール摩耗、サーマルクラウン予測モデルから得られるロールプロフィールを用いて、ロールシフト後のギャッププロフィールを求め、それを最も平準化するシフト位置

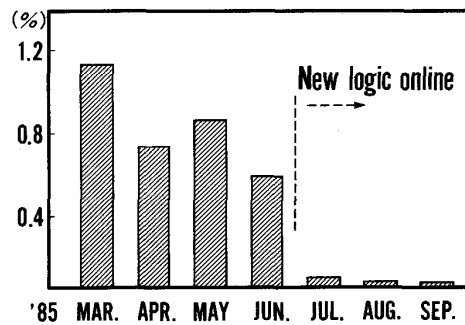


Fig. 1. Percentage of over 20 μm "Cat's ear" occurrence on the strip.

を探索する。

(2)ステップ2

(1)の解が複数個あるときは、ロールプロフィールに着目して、その中で摩耗を最も分散できる位置を探索する。

(3)ステップ3

さらに複数個の解が存在するときは、サーマルクラウンを最も分散するシフト位置を探索する。

このワークロールシフト法を適用するにあたり、今後予想される幅逆転のレベルに応じて、(1)～(3)の評価順位を変更することで、幅逆転および同一幅連続圧延規制を、大幅に緩和することができ、シフト量 150 mm と小さい設備条件下でも、Fig. 1 に示すように異常プロフィールの発生防止に顕著な効果を発揮し、幅逆転フリー化実現の基盤技術となつている³⁾。

一方、ロール材質面からも、新しく高クロム鑄鉄ロールを導入し、当ロールに特有の表面性状・耐事故性を改善するため、ロール冷却水圧のダイナミック制御、油潤滑圧延とを併用して、これらを克服した使用法を確立し、摩耗の軽減を図っている。

3.2 製品の平坦度・クラウンの同時制御技術

6Hi ミルを導入し、クラウン制御能力は飛躍的に向上したとはいえ、当設備の機能を効果的に活用するためには、しつかりした理論と、確実なデータに裏付けられたソフト技術を確立する必要がある。

熱延タンデムミルでクラウン制御を行う場合、上流スタンドのクラウン変化が、下流スタンドでどのように変化するかを定量化することが課題となる。

この変化の機構を、クラウンの遺伝性とロール形状からの転写の現象で整理・定量化し、オンライン制御に結びつけた⁵⁾⁶⁾。出側クラウン比率に対する、入側クラウン比率の影響（クラウン遺伝係数 $\bar{\eta}$ ）は、Fig. 2 (a) に示すように、幾何学因子 γ を介して表現でき、さらに、ロールからの転写を考慮すると、(1)式によつて定量

的・論理的に表現できる。

$$C_h = \zeta \cdot \bar{c} + (1 - r) \cdot (1 - \zeta) \cdot (C_H - \phi_0 \cdot H)$$

$$= \zeta \cdot \bar{c} + \eta \cdot (1 - r) \cdot (C_H - \phi_0 \cdot H) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 \bar{c} : ロールキャンバー

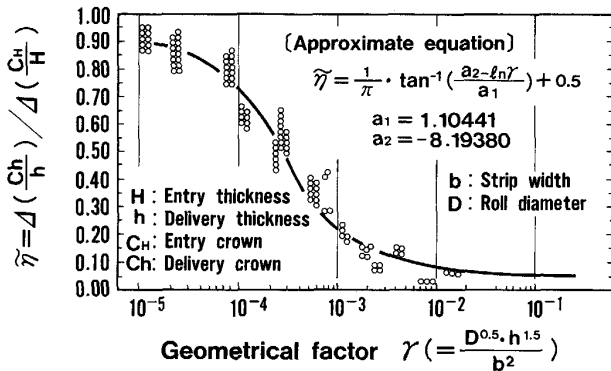
r : 压下率

ζ : 転写率 ($1 - \zeta = \eta$)

ϕ_0 : クラウン比率の補正項

クラウンを変化させると、長さ方向の変形にも幅方向で差が生じ、板の平坦度(形状)の変化となつて現れる。

(a) Crown transfer coefficient: $\bar{\eta}$



(b) Flatness transfer coefficient: ξ

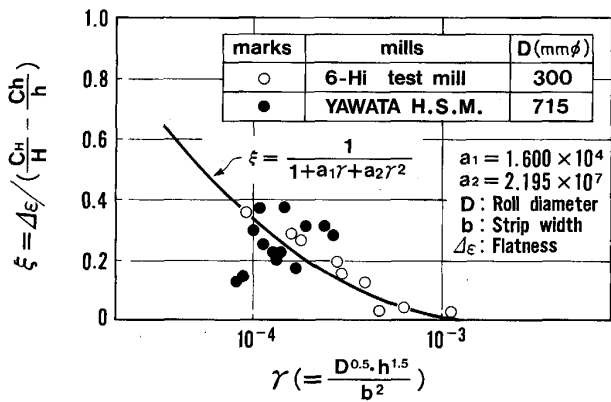


Fig. 2. Mass model of material flow.

従来、クラウン変化に伴う形状変化の明快な理論がなかったが、Fig. 2 (b) に示すように、形状変化係数 ξ も幾何学因子 γ によつて、定量的に整理できることを見出した。この結果を利用して、目標のクラウンと平坦な形状とを同時に得る手順を示したのが Fig. 3 である。

まず目標クラウンを達成する解として、後段中伸び・後段耳延びの二つの極限解を求めた上で、ここでは圧延中の制御余裕代を考え、中間点をもつて最適解とする。オンライン制御では、ロールプロフィールおよび、粗バー・クラウン推定誤差等による外乱が予想され、実績と計算クラウンの差を、学習手法によつて改善し、精度向上を図つた。Fig. 4 には同時制御の適用結果を表す。

3.3 高精度圧延技術

3.3.1 高精度板厚制御技術

鋼種・サイズの大幅に異なる SFR では、1本ごとに圧延条件が大きく変化するため、圧延実績を反映させる

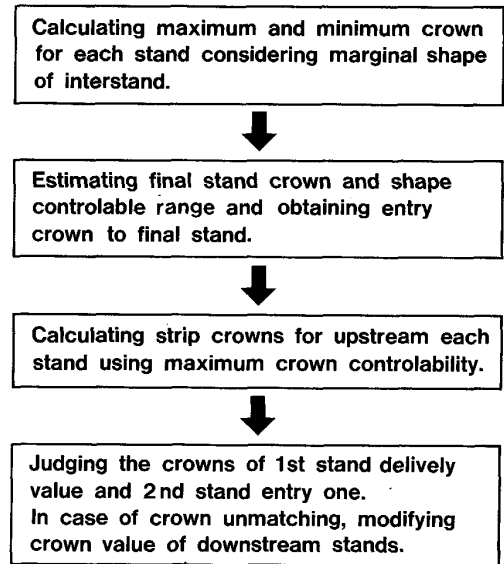
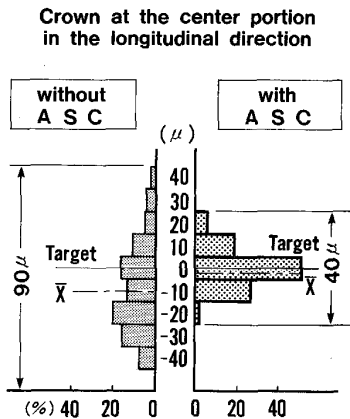


Fig. 3. Algorithm of strip crown schedule for obtaining aimed crown.

(a) Profile (crown) control accuracy



(b) Shape control accuracy

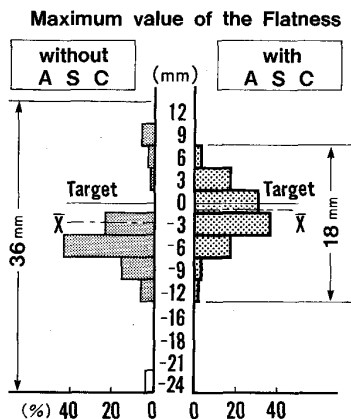


Fig. 4. Results of ASC (Automatic Shape Control).

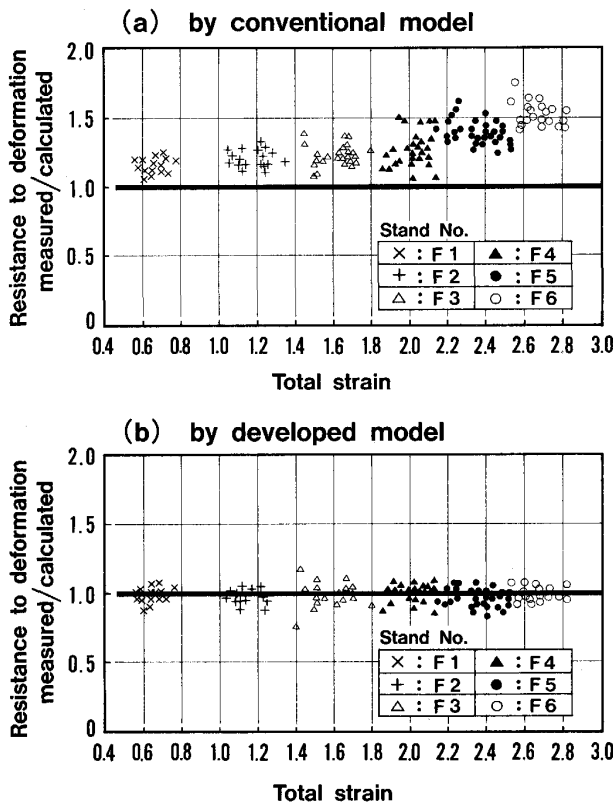


Fig. 5. Comparison of the resistance to deformation measured with those calculated by models.

ことが困難となる。従来以上の板厚精度を確保するための重要因子である、変形抵抗および摩擦係数を正確に把握し、予測につなぐため、定量的・高精度なモデルを開発した。これを、全スタンド油圧圧下設備等の高度なハードと有機的に結びつけ、大幅改善を図った。

(1) 新変形抵抗式の開発

従来の熱間変形抵抗予測式は、1段加工の経験式であるため、熱延のように高速多段加工に適用する場合、誤差が大きかった。そこで、金属物理の原点である転位密度を媒介とした新変形抵抗式(2)式を開発・導入し⁷⁾、Fig. 5のごとく、その誤差を飛躍的に向上できた。

$$\sigma = a_1 \cdot \rho^{1/2} + a_2 \cdot d^{-1/2} + a_3 \cdot \{a_4 - a_5 T \cdot \ln(a_6 \rho / \epsilon)\} \dots (2)$$

ここで、 σ : 変形抵抗

$a_1 \sim a_6$: 定数

T : 加工温度

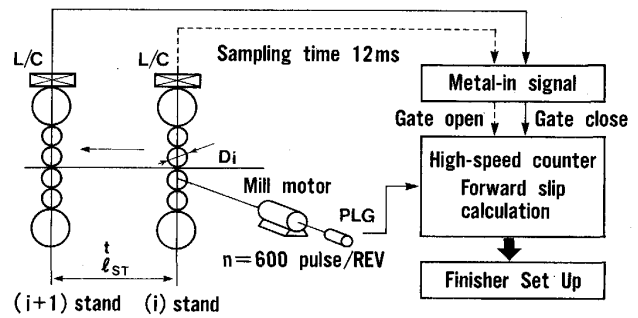
ϵ : ひずみ速度

ρ : 転位密度

d : 粒径

上の第1項は転位の応力場などの応力、第2項は粒界の抵抗、第3項は転位の運動に対する摩擦抵抗を表す。

(2) 摩擦係数の検出と設定モデルへの反映



$$f = \frac{V_S}{V_R} - 1 = \frac{V_S \cdot t}{V_R \cdot t} - 1 = \frac{l_{ST}}{l_R} - 1 \dots (1)$$

$$l_R = \pi D_i \cdot N / n \dots (2)$$

where f : Forward slip V_S : Material speed
 V_R : WR surface speed

l_{ST} : Distance between (i) and (i+1) stands

l_R : Length of WR rev. during the time (t)

t: Time between (i) and (i+1) stands metal-in

N: Total pulse count during the time (t)

n: PLG pulse count per one rev. of WR

D: WR diameter

Forward slip can be obtained from equations (2) and (1)

Fig. 6. Forward slip measuring system.

仕上設定精度向上のため、ロールと材料間の摩擦係数の評価を正確に把握することが重要である。そこで、鋼種ごとあるいは圧延の進展につれて変化する摩擦係数を、オンラインで定量的に把握する先進率計測システム (Fig. 6) を開発した⁸⁾。

3.3.2 高精度板幅制御技術

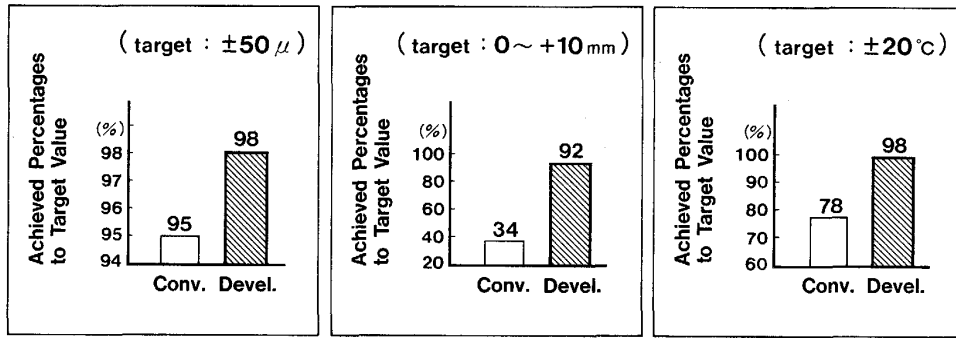
八幡・熱延は、すべての縦ロールに油圧圧下装置を装備し、ソフト技術を駆使して成果を挙げているが、特に、板幅精度を支配する重要な因子である、温度を考慮したモデル式を導入し、幅制御精度を一段と改善した⁹⁾。

これらの高精度板幅制御技術と最大 350 mm の幅大圧下技術とを組み合わせることによつて、連鑄設備のエネルギー向上ならびに SFR の拡大に大きく寄与している。

このほか、現代制御理論を適用したコイル冷却速度制御技術等、各要素技術を開発・確立した結果¹⁰⁾¹¹⁾、SFR 操業の厳しい圧延条件下でも、各品質項目とも高精度を達成できた (Fig. 7)。すなわち、これら精度向上技術が SFR 拡大の基盤となつていることを物語っている。

3.4 総合的計算機適用技術

熱延の作業は SFR 化に伴つて複雑化し、一方で、品質の厳格化、多様化に対応するための精緻な設定・監視が要求されるなど、もはや運転者の技量や判断力では対応不可能となつてきた。このために、プロセス制御用として初めて、光ケーブルによる大規模 LAN を導入し、高度な計算機システムを駆使して高効率生産を実現した。また、人間の五感を凌駕するおびただしい数の設備・



(a) Overall strip thickness accuracy (b) Overall strip width accuracy (c) Overall coiling temperature accuracy

Fig. 7. Comparison of the conventional technology and the developed technology in terms of quality indexes.

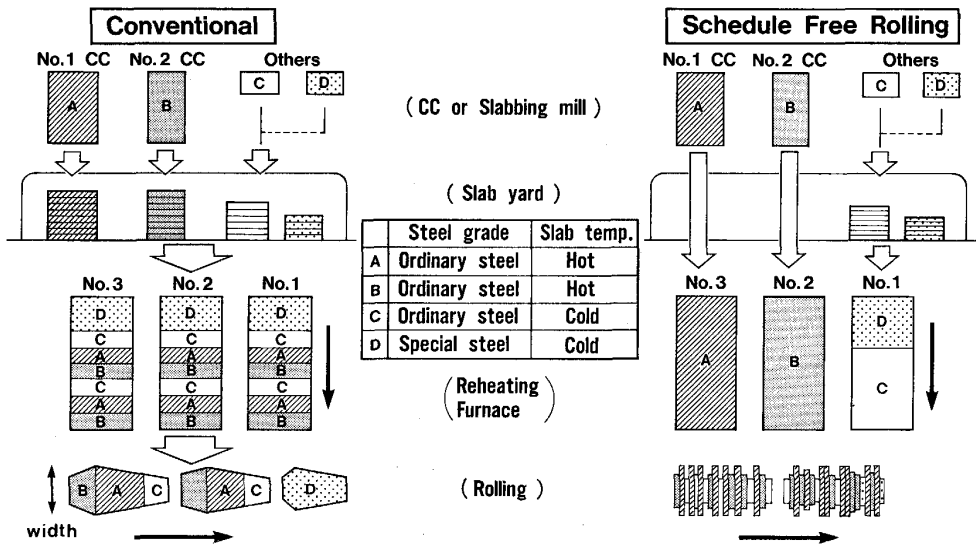


Fig. 8. Comparison of hot strip mill operation.

Table 1. Comparison of schedule restrictions.

Restrictions	Conventional	SFR
Shift from narrow to wider width	0 mm	Free
Thickness change	1/2~2 times	1/4~4 times
Rolling length with the same width	23 km	90 km
Number of work roll curve	8	1
Number of C. C. slab width grouping	30	11
Number of mixed rolling with different steel grades	0	5

装置の稼働状況の監視、品質厳格化・多様化に伴う1本ごとに異なる判断基準に迅速・的確に対応するため、総合的自動設備・品質診断システムを開発・実用化し、設備の信頼性向上と品質の安定化が実現できた¹²⁾。

3.5 生産工程管理技術

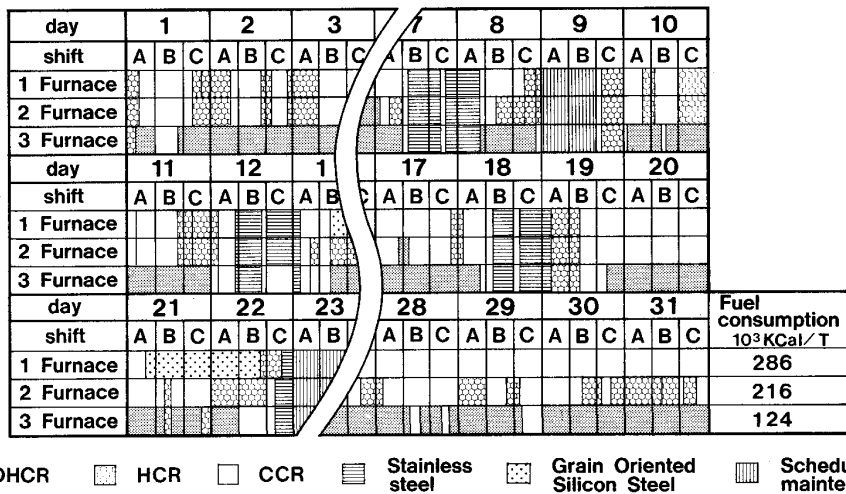
前述の4技術の開発により、SFRを実現するための障害要因を克服し、Table 1に示すように、幅逆転の完

全フリーをはじめとして、スケジュール制約を大幅に緩和した。このSFR技術を有効に活用するため、製鋼-熱延一貫オンライン工程管理システムを構築し、DHCRの拡大を図ってきたが、さらに加熱炉使い分けサポートシステムの開発²⁾を加え、SFRの長所を一段と効果的に発揮させることが可能となった。この結果、Fig. 8に示すように、3号炉には、製鋼工場の1号連铸機からテーブルを介して直接送られてくるDHCR材を、1・2号炉には冷片(CCR)もしくは、2号連铸機から出片された熱片(HCR)を装入し、その装入温度に応じて加熱炉を使い分ける操業ができるようになった。

この実施例として、月間での加熱炉装入実績をFig. 9に示す。

4. SFRの成果

このように、熱延ミルにおけるSFR技術が確立した



Shift A : AM 7:00~PM 3:00 B : PM 3:00~PM 10:15 C : PM 10:15~AM 7:00

Fig. 9. An example of rolling schedule result under SFR operation through a month.

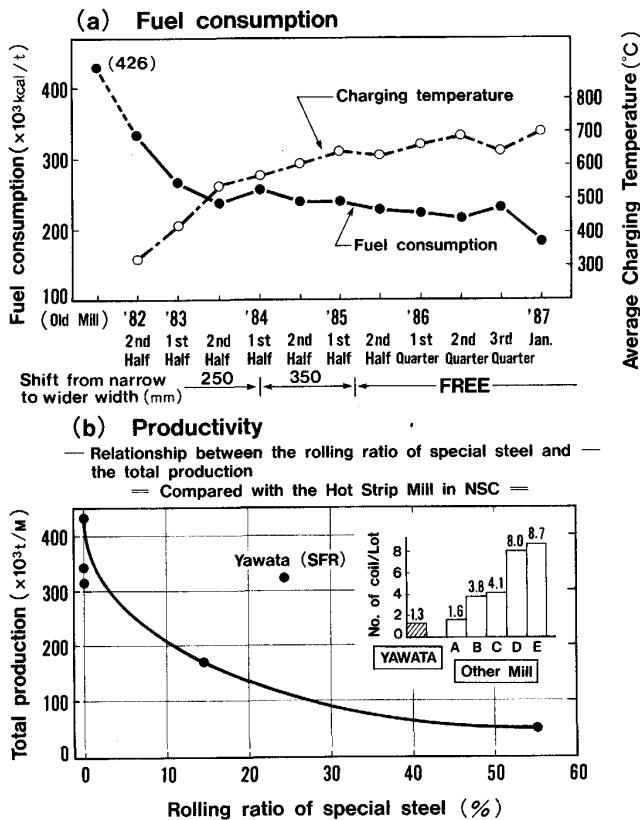


Fig. 10. The effects of SFR operation.

結果、八幡・熱延のような多品種・大量生産ミルにおいても、加熱炉使い分け技術を駆使し、効率的な連鑄～熱延直結・連動操業が可能となり、

- ①燃料原単位的大幅な削減 (Fig. 10 (a))
- ②多品種、小ロット生産の条件下で、高能率生産を可能とした (Fig. 10 (b))

- ③高精度の板厚・板幅・温度制御を実現
 - ④その他、スラブ在庫量の削減、大幅な要員合理化、短納期生産等を実現
- など、その成果は極めて大きく、当技術、特に、平坦度・クラウン制御技術およびワークロール・シフト機構は、国内外のミルに急速に普及している。

5. 新世代 CC-HDR プロセスの紹介

CC-HDR プロセスについては、これまで新日本製鉄(株)・堺および日本鋼管(株)・福山製鉄所の熱延ミルで実用化され、その偉力を発揮してきた^{13)~18)}。これらは連鑄設備を熱延ミルに近接して設置し、CC-HDR 材と加熱炉材とをそれぞれ独立したコフィン・スケジュールで圧延するもので、CC-HDR の適用は限定されていた。一方、既存の連鑄設備と熱延ミルとは遠く離れて設置されている場合が多い。このため、鑄片輸送中での温度降下が大きく、実用化は困難とされ、能率的にも不利と考えられていた。

新日本製鉄(株)では、これらの課題解決のため、SFR 技術を活かし距離と能率を克服できる、より普遍的な新世代 CC-HDR プロセスの開発に踏み切り、昭和62年6月にその操業を開始した (Fig. 11)。

CC-HDR を可能にする技術は次の三つに大別されることは、周知のとおりである。

- (1) 温度確保技術
 - ①高温鑄片の製造とスラブ放熱防止
 - ②幅方向エッジ部の温度補償
- (2) 高温における無欠陥鑄片製造技術
- (3) 連鑄～熱延工程管理技術

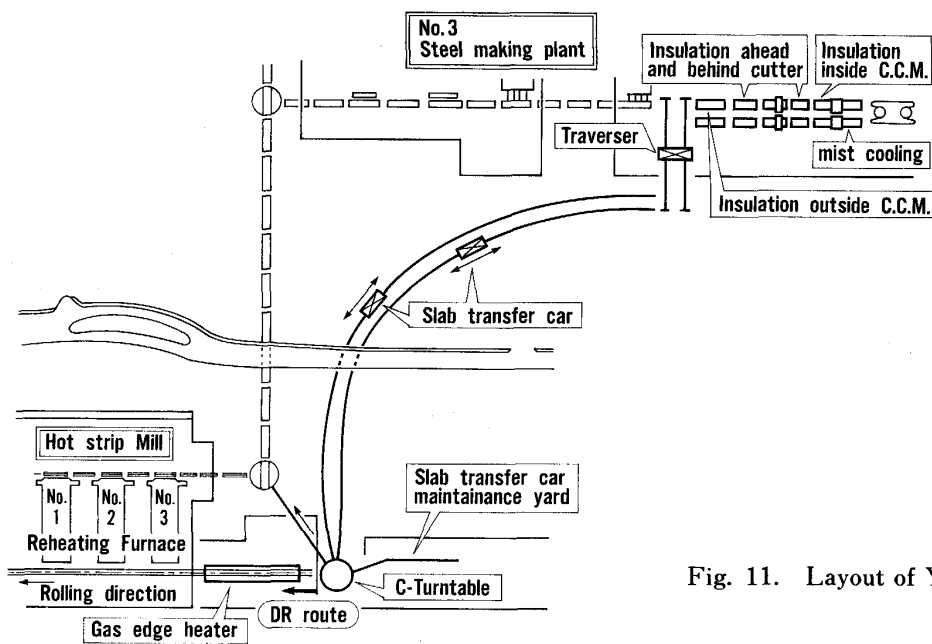


Fig. 11. Layout of Yawata CC-HDR process.

ここでは、遠距離間での CC-HDR の実現にあたって、最大の課題である(1)の温度確保上の考え方、および、稼働後の実態について簡単に紹介する。

5.1 温度確保技術

八幡・熱延ミルは省エネルギー指向で設計された高速圧延ミルであり、この装備力と界での経験を活かし、連铸設備およびスラブ輸送中の温度低下防止を中心に、今回下記の3点で新技術を開発、導入した。

- ①連铸機機端(切断)以降の徹底した防熱対策
 - (a)スラブ切断機内での移動式カバーの採用
 - (b)ルミナスバーナーによる連铸機機外での保熱強化
- ②高速度スラブ搬送台車の採用

既設の長いテーブルでの搬送では開口部も多く、そのための温度低下が大きいのに対し、高速台車の場合、完全保温状態で搬送できるため温度低下を抑制でき、特に、エッジ部の温度低下防止に顕著な効果があることによる。

- ③噴流フレーム式ガス・エッジヒーター(以下、GEHと略記)の採用

今回幅方向エッジ部の温度補償装置として、GEHを導入したのは、誘導加熱方式に比べ

- (a)スラブ切断面の温度補償能力が高い
- (b)加熱炉から抽出されるスラブと CC-HDR ルートで直送されるスラブとのタイミング調整に関しての保熱能力を生かし、待機調整が容易である
- (c)連铸機における幅変更・異幅铸造など、スラブ幅変化への対応力が高い
- (d)設備費が安価なこと

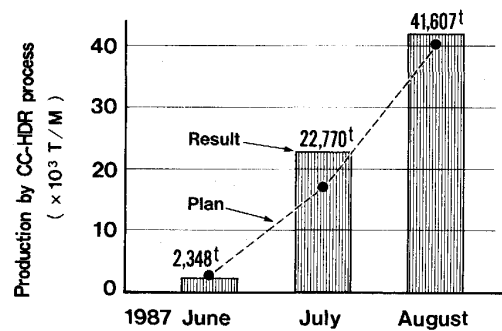


Fig. 12. Start-up of CC-HDR operation.

を考慮して導入したものである。

5.2 CC-HDR の実施状況

CC-HDR 稼働後3か月間の実施状況を Fig. 12 に、また CC-HDR、加熱炉両プロセスから供給されるスラブの、圧延ミルにおける混合圧延の実施例を Fig. 13 に示す。SFR 技術を武器として、順調に新世代 CC-HDR プロセスが稼働している。

6. あとがき

SFR 技術の開発により、随時生産システムが実現し、このことによつて、激変・多様化する鋼材市場動向に対応すると同時に、経済的にも極めて大きな効果を発揮し、新時代の熱延ミルを実現した。本技術は、将来の鉄鋼製造技術として世界的にも注目を集め、急速に他のミルにも普及してきた。特に、新たに稼働した新世代 CC-HDR プロセスの実現によつて、その効果はますます大きく広がってきた。この連铸～熱延完全直結プロセ

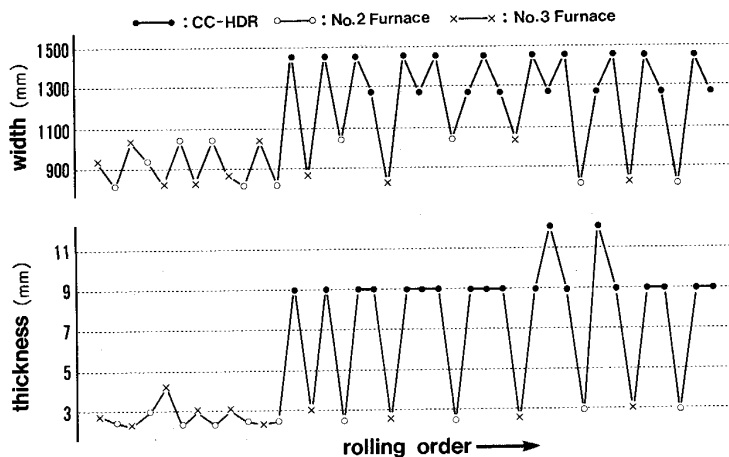


Fig. 13. Example of rolling schedule under CC-DR operation.

スの早期完遂に向け、いつそのの改善に遭進していく所存である。

文 献

- 1) T. ASAMURA : Advanced Technol. of Plasticity, 2 (1984), p. 1220
- 2) 浅村 峻, 伊藤洋二, 田中正二, 近江 洋 : 鉄と鋼, 72 (1986), S 328
- 3) 唐戸彰夫, 小田高士, 猪井善生, 堀江正信 : 鉄と鋼, 72 (1986), S 329
- 4) 浅村 峻, 藪田俊樹, 田中正二, 伊藤洋二, 猪井善生, 小田高士 : 鉄と鋼, 72 (1986), A 191
- 5) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 栗津原博, 木村智明, 志田 茂, 梶原利幸 : 塑性と加工, 23 (1982), p. 1172
- 6) 田中 晃, 田中正二, 小川 茂, 米田 年, 浜渦修一, 菊間敏夫 : 昭和 59 年度塑性加工春季講演会 (1984), p. 33
- 7) 矢田 浩, 瀬沼武秀 : 塑性と加工, 27 (1986), p. 34
- 8) 小田高士, 浜渦修一, 田中 晃, 菊間敏夫, 田中正二 : 昭和 59 年度塑性加工春季講演会 (1984), p. 29
- 9) 福重義和, 近江 洋, 中山 豊, 田中正二, 米田 年, 大島有三, 菊間敏夫 : 昭和 59 年度塑性加工春季講演会 (1984), p. 21
- 10) 小西政治, 河原敏彦, 久保利吉, 大島有三, 菊間敏夫 : 鉄と鋼, 70 (1984), S 1106
- 11) 久保利吉, 大島有三, 小西政治, 河原敏彦, 小笠原昭宣, 菊間敏夫 : 鉄と鋼, 70 (1984), S 1107
- 12) 小笠原昭宣 : 計測と制御, 24 (1985), p. 34
- 13) 蜂谷整生, 浅野総一郎, 佐々木智久 : エネルギー・資源, 4 (1983), p. 449
- 14) 高橋秀光, 木下健太郎 : 高温学会誌, 9 (1983), p. 84
- 15) 椿原 治, 沖森真弓, 池崎英二, 武田 彰, 磯上勝行, 仁木隆司 : 鉄と鋼, 72 (1986), S 328
- 16) 内田繁孝, 谷口 勲, 和田 勉, 竹中正樹, 小澤宏一, 手嶋俊雄 : 72 (1986), A 171
- 17) 杉田公義, 大井純一 : 製鉄研究 (1984) 313, p. 28
- 18) 久々宮明, 椿原 治, 藤井義博, 吉田 透, 松下晏宏, 吉岡信夫, 牧角一弘, 細川正行 : 製鉄研究 (1984) 313, p. 33