

© 1988 ISIJ

## 技術報告

既設ホットストリップミルにおける  
スケジュールフリー圧延対応操業技術笠井 勝\*・徳長幹恵\*・柴田正司\*  
小川哲也\*・竹本 統\*<sup>2</sup>・渡邊英一\*<sup>3</sup>

## Schedule-free Rolling at Existing Hot Strip Mill

Masaru KASAI, Mikie TOKUNAGA, Syoji SHIBATA,  
Tetsuya OGAWA, Osamu TAKEMOTO and Hidekazu WATANABE

## Synopsis :

In order to achieve schedule matching between the continuous casting and hot rolling operations, thus ensuring the maximum benefits of "Hot charge rolling," we have established the schedule-free hot rolling technology that frees the continuous casting operation from various restrictions of the downstream hot rolling operation. Starting from the Kimitsu-developed crown control process ("NBCM rolling method"), we have developed the rolling-mill arrangement, which combines the NBCM (New Back up roll Crowning Mill), the high-strength work roll bender, and the work roll shifting device and has functions nearly equal to those of the 6-high rolling mill. In addition, we have also developed and successfully put into practice the high precision preset control model, the hot-rolling dynamic control model and the automatic scheduling function, aimed at the maximum utilization of the above rolling-mill arrangement, resulting in substantial achievements in energy conservation and yield improvement.

**Key words :** hot strip mill ; hot charge rolling ; schedule-free rolling ; NBCM ; work roll shift ; crown control.

## 1. 緒 言

君津製鉄所熱延工場（以下君津熱延）では、HCR（Hot Charge Rolling）材は複数の連鑄機から貨車により輸送され、連鑄機間で鑄造されるスラブ幅も大きく異なることが多く、その物流は複雑で、製鋼-熱延の同期化を図る上で大きな障壁となっていた。

しかるに多様化・短納期化するマーケットニーズへの迅速かつ適確な対応、徹底したコストダウンを図るために、連鑄～熱延間の最適操業を実現する必要性が強まってきた。

この課題に対応するため、君津熱延では仕上圧延機改造にあたり、君津製鉄所で開発したクラウン制御法（NBCM (New Back up roll Crowning Mill) 圧延法<sup>1)2)</sup>）をさらに発展させ、6Hi ミルとほぼ等価な機能を有する、NBCM、強力ワークロール（以下 WR）ベンダーおよびワークロールシフトの組合せによるミル群を開発した。

さらにこのスケジュール・フリー・ミルハードを極限まで有効活用する 1) 仕上圧延機プリセット・モデル、2) コイル内クラウン制御、3) 自動スケジューリング機能等を開発した。本報では、これらの技術を結合した、既設ミルにおけるスケジュール・フリー圧延対応操業技術について述べる（スケジュール・フリー圧延は以下 SFR）。

## 2. SFR 化設備改造における基本的考え方

従来からのスケジュール制約を大幅に緩和し、HCR 材のスラブヤード滞留時間の短縮による加熱炉燃料原単位向上、さらに SFR 下において板厚精度等の品質精度向上を実現するための主要な要素技術は、

1) ワークロールカーブ統一という条件下において要求に応じた板クラウンの鋼板を製造可能なクラウン制御技術

2) 幅移行規制緩和のためのロールプロファイル平滑化

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

\* 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

\*2 新日本製鉄(株)設備技術本部 (Plant Engineering & Technology Bureau, Nippon Steel Corp.)

\*3 新日本製鉄(株)設備技術本部 (現:高砂鉄工(株)) (Plant Engineering & Technology Bureau, Nippon Steel Corp., Now Takasago K. K.)

Table 1. Mill specifications and conditions of calculation.

Mill type	Roll size (mm)				Crown control condition
	Roll type	Diameter	Barrel length	Distance between chocks	
Conventional 4-high mill	BUR WR	1 580 780	2 235 2 286	3 250 3 048	Bending force : ±90 (t/c)
NBCM+Bender	BUR WR	1 580 780	2 235 2 286	3 250 3 048	Bending force : ±180 (t/c) BUR curve : 1.5 mm/diameter
Cross mill	BUR WR	1 580 780	2 235 2 286	3 250 3 048	Bending force : ±90 (t/c) Crossing angle : 1.0°
6-high mill	BUR IMR WR	1 250 600 650	2 235 2 286 2 286	3 250 3 000 3 048	Bending force : ±120 (t/c) IMR shift : 668 mm

技術  
である。

2.1 クラウン制御能力の検討

新日鉄では、熱間圧延におけるクラウン・形状制御の重要性を認識し、NBCM 圧延法の実施、ダブルチョック・ベンダーの導入<sup>3)</sup>、さらに新設ミルに 6Hi ミル<sup>4)</sup> およびクロスミル<sup>5)</sup> を装備するなどクラウン制御ミルの開発を行ってきた。

既設ミルのクラウン制御能力増強化改造にあたり、6Hi ミル、クロスミルを含めた各種クラウン制御ミルの既設ミルへの適用可否検討を行った。

2.1.1 単スタンドクラウン制御能力

クラウン制御能力の比較にあたっては、松本ら<sup>6)</sup> の開発による均一荷重板クラウンモデルを使用し、各ミル型式の限界条件における均一荷重板クラウン（板端から 25 mm で定義）*C* を計算した。これは材料条件と独立にロール変形を計算するモデルで圧延機自身の変形条件を表している。F5 スタンドを想定し、厚さ 5.0 mm から 3.5 mm まで圧延する場合を例にとり単位幅荷重を 1 490 t/m (780 mm 径) および 1 250 t/m (650 mm 径) とした場合の、Table 1 に示す仕様の各種ミル型式のクラウン制御能力を比較検討した。結果を要約すると、

- 1) ワークロールベンダーは幅狭材に対しては制御能力が小さい
- 2) クロスミルは各板幅に対し最も大きな制御能力を有している

ただし、ここで重要なことは、形状制約を考慮した、当該スタンドにおける所要クラウン変更を達成するに必要なかつ十分なクラウン制御能力を有しさえすれば良いということである。

Fig. 1 は、チョック当たり 90 t (以下 t/c) の WR ベンダーを装備した従来の 4Hi ミルのクラウン制御能力を基準にし、NBCM によるクラウン制御特性を示したものであるが、特に材料の幅が狭い場合に改善効果が顕著である。ここでバックアップロール (以下 BUR) に

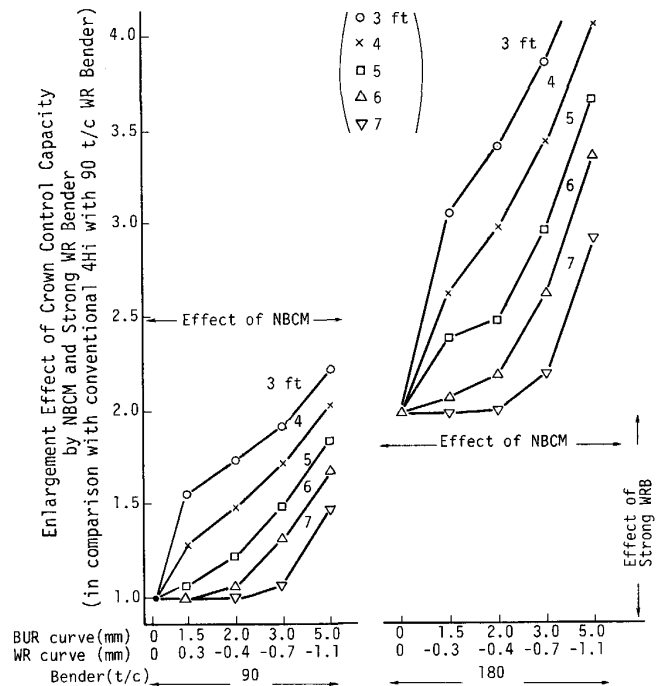


Fig. 1. Enlargement effect of crown control capacity by NBCM and strong WR bender.

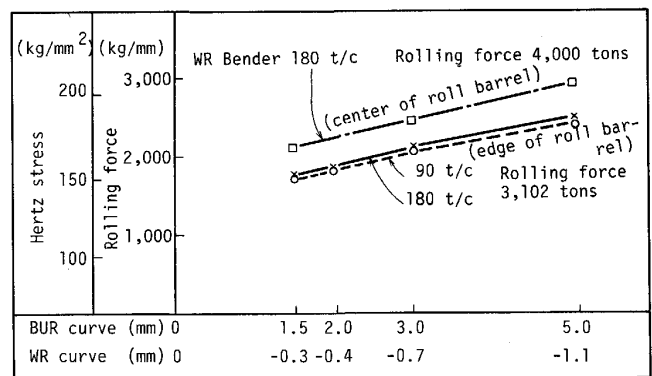


Fig. 2. Relation between BUR curve and Hertz stress.

正のクラウンを付与すると、材料の幅が広い場合には負の板クラウンが生じやすくなるため、WR には適正な負のクラウンを付与することが重要である。また BUR ク

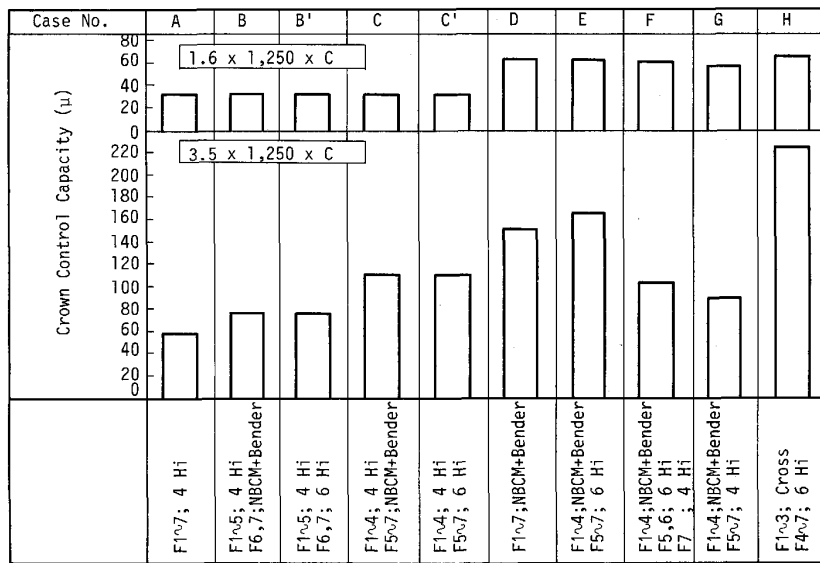
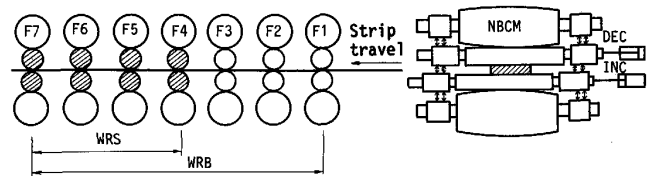


Fig. 3. Crown control range of tandem mills.

ラウンを大きくするに伴い、クラウン制御能力は大きくなるが、同時に WR~BUR 間の最大線荷重も増大する。Fig. 2 に示すように、最大圧延荷重 4000 t, WR ベンダー 180 t/c, 許容最大ヘルツ応力 200 kgf/mm<sup>2</sup> とすると、BUR クラウンは 5 mm 程度が限界となる。

2.1.2 タンデムクラウン制御能力

既設ミルを改造する場合には、必要クラウン制御能力に対する充足度のみならず、工事休止による上下工程との生産バランス、改造費用等を総合的に検討しなければならない。Fig. 3 に 6Hi およびクロスミルを前段および後段から連続 2~3 スタンド適用した場合のタンデムクラウン制御能力を示す。計算前提は Table 1 に示すとおりで、形状制約はスタンド間で ±2.5%, F7 出側でフラットとした。一般的にタンデムスタンド全体としてのクラウン制御能力を増大させるためには、後段スタンドから制御能力を増強することが効率的である。しかし、1.6 mm のように板厚が薄い場合には、後段スタンドの制御能力が形状制約のために有効に使用できない。このため、改造スタンド数が限られている場合、前段スタンドの改造の方が効率的なこともある。このように各種サイズに対し、常に十分な制御能力を得るためには、F1~F7 スタンドについてバランスのとれた改造を行う必要がある。Fig. 3 中のケース D に示すように、NBCM と強力ベンダーを全スタンドに設置するミル群が既設ミル改造には最も適しており、このミル群のタンデムとしてのクラウン制御能力は、単スタンドでは 6Hi およびクロスミルの能力に劣るものの、全体としては君津熱延の品種構成において、F5~F7 の 3 スタンドに 6Hi ミルを適用したミル群と実用上同等以上のものとなっている。



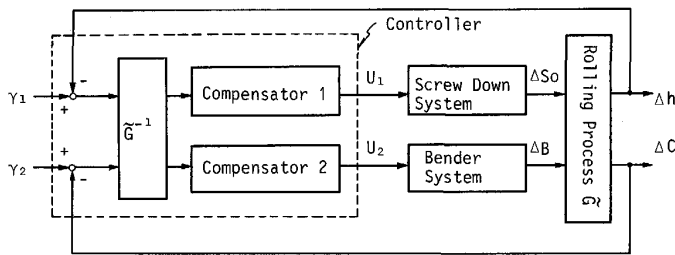
Item	Stand No.	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
Increase bender (t/c)		200	200	200	200	200	200	200
Decrease bender (t/c)		160	160	160	160	160	160	160
Work roll shift stroke (mm)		±150	±150	±150	±150	-	-	-

Fig. 4. Configuration of finishing mill revamping.

2.2 ワークロールシフト量の検討

スケジュールフリー圧延を実現する上で、幅移行に関する制約を緩和するためには、WR の摩耗およびサーマルクラウンの平滑化を図らなければならない。このため従来より WR 摩耗および偏摩耗が大きく成品プロファイルにも影響の大きい F4~F7 の後段 4 スタンドにワークロールシフト (以下 WRS) を導入することとした。WRS 量の検討にあたっては、単にロール摩耗およびサーマルクラウンの分散・平滑化のためならば ±75 mm 程度のストロークで十分と考えられたが、幅逆転可能量 (幅狭材とそれに後続して圧延される幅広材との板幅差) と HCR 材のスラブヤード滞留時間との関係のシミュレーションにより、設備費も考慮した上で最も効率的な幅逆転量 300 mm を見出し、これを実現するために ±150 mm の WRS 量と決定した。

以上の検討により決定した改造ミル仕様を Fig. 4 に示す。



$U_1$  : Speed command     $U_2$  : Bending force command     $\Delta S_o$  : Roll position deviation  
 $\Delta B$  : Bending force deviation     $G$  : Effect coefficient matrix  $\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta C \end{bmatrix} = \tilde{G} \begin{bmatrix} \Delta S_o \\ \Delta B \end{bmatrix}$

Fig. 5. Configuration of simultaneous control system.

### 3. SFR ミルハードを活用するソフト技術

#### 3.1 クラウン制御プリセットモデル

クラウン制御モデルは既に報告<sup>1)</sup>しているように、基本構成モデルは均一荷重板クラウンモデル<sup>6)7)</sup>を使用しているが、今回 WRS ミルの導入にあたって、以下に記述する改造を実施した。

1) 圧延荷重の項、ロールベンダーの項、およびロールプロフィールの項はそれぞれ、BUR~WR 間接触長さの変化、ロールベンダーの荷重作用点の変化、幾何学的平行移動等により変化する。

2) ロールプロフィールの項については、サーマルクラウンモデルおよびロール摩耗モデルにおいて、板とロールの幅方向接触部の変化を考慮する。

3) 上、下 WR の非対称シフトを考慮して、WR たわみの算定は上、下 WR それぞれ 1 本ずつについて行うものとし、おのおのについて均一荷重板クラウンを計算したのち、上下の平均化操作を行う。

以上述べた対策と学習機能の採用により、目標クラウンに対し  $2.5\sigma$  で  $\pm 20 \mu\text{m}$  の制御精度を達成している。

#### 3.2 コイル内クラウン制御モデル

SFR の実施により、従来に比較し厚み移行および幅移行ともに大きくなった。そのためクラウン制御を行う上で、WR ベンダーの設定力のコイル間の変化も従前に比して大きくなり、プリセットの学習制御のみでは十分な制御精度が維持できない懸念があった。また長手方向のクラウン変動を極小化する必要性から、今回新たに開発したコイル内クラウン制御<sup>8)9)</sup>の機能について以下に述べる。

##### 1) トップモニター制御

材料トップ部の実測クラウンが目標クラウン値と一致しない場合に、目標値に近づけるように WR ベンダーにより制御する。

##### 2) モニター制御

コイルミドル部以降において幅方向中央部板厚とエッジ部板厚から、幅偏差・横振れを考慮して長手方向各点のクラウンを演算し、目標クラウンとの偏差に応じて WR ベンダー設定値の補正を行う。

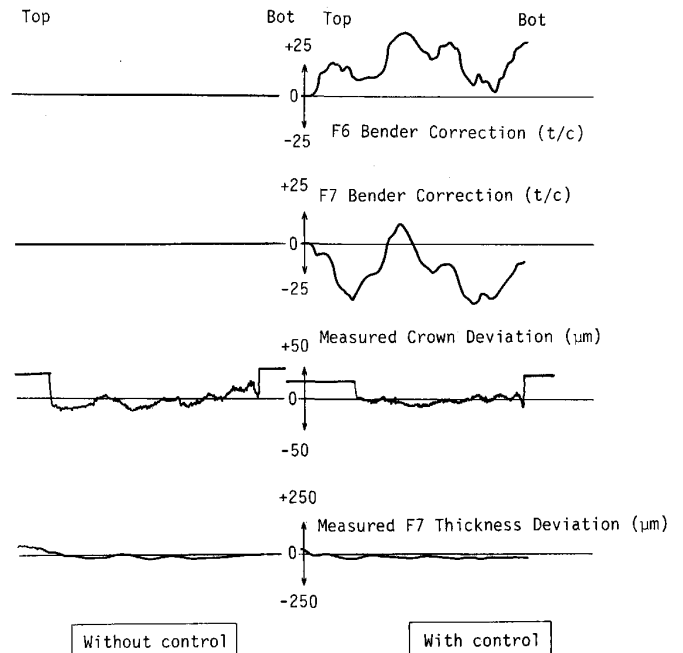


Fig. 6. Effect of hot-rolling dynamic crown control.

##### 3) ロックオン制御

荷重変動によるクラウン変動を補償し、ロックオンクラウン値に一定となるよう制御。

##### 4) 適応ベンダー制御

仕上設定計算であらかじめ求めた予測圧延荷重と噛込み時の実測荷重の偏差を求め、荷重偏差によるクラウン偏差を補償すべく、噛込みスタンド以降の WR ベンダー初期設定値の補正を行う。

さらに、上記の制御をコイル内で実行しようとした場合、クラウン制御と板厚制御は互いに他方に対して外乱となる相互に干渉する系であるので、この干渉を補償する板厚・クラウン同時制御法<sup>9)</sup>を新たに開発した。Fig. 5 に今回開発した同時制御系の構造を示す。この同時制御法は、2 入力 2 出力系を二つの 1 入力 1 出力系として独立に設計できるため、補償器 1 の制御ロジックは従来のものを完全に流用でき、全体の制御ロジックの改造範囲とチューニング時間を半減できた。ここで  $\Delta h$ ,  $\Delta c$  は各スタンド出側板厚およびクラウンの変化量であり、 $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  はその目標値である。補償器 2 には完全制御<sup>10)</sup>

の手法を用いている。Fig. 6 は本制御適用の 1 例を示しているが、板厚への外乱を与えることなく、目標クラウンとの偏差を WR ベンダーのダイナミック制御により低減している。

3.3 ワークロールシフト制御モデル

君津熱延では、WRS は幅逆転および同一幅圧延の拡大に対応するためのロールプロフィール平滑化を目的としており、クラウン制御の制御端としては考えていない。

SFR が実現され、スケジュール作成の制約が大幅に緩和されると、幅移行に関しても多種多様な圧延スケジュールが発生する。幅逆転量の拡大という目標に対し、従来どおりの周期的なシフト制御では限界があつた。スケジュールの後半に大きな幅逆転があるようなスケジュールでは、スケジュール前半の幅広材を最大シフト位置まで動かし、積極的に板道を広げてやるようなシフト制御方法が必要である。

今回開発したモデルは、スケジュール全体の圧延に対する板 1 本ごとの WRS 量の最適化を図っており、圧延スケジュールの構成と実時刻におけるロールプロフィール推定値を用いて、スケジュールの最終圧延材までの全体にわたってロールプロフィールを平滑化する制御方法である。この WR プロフィール平滑シフト制御の概要について以下に述べる。

- 1) 実績圧延荷重および通板時間等から WR 摩耗量と膨張量を計算し、実時刻の WR プロフィールを求める。
- 2) 次材圧延後および N 本圧延後の WR プロフィール変化量を、仮定した WRS 量と各圧延予定材の板幅に応じた WR 摩耗量から計算する。
- 3) すべての WRS 位置について、次材および N 本圧延後の WR プロフィールと、おのおのあらかじめ与えている WR プロフィール目標値との差の 2 乗積分値を計算する (評価関数はそれぞれ  $I_{next}$  および  $I_{future}$ )。
- 4) 次にその和  $I_{next} + I_{future}$  を最小にする WRS 量を  $I_i$  から求め、次圧延材に対する WRS 位置の設定値とする。

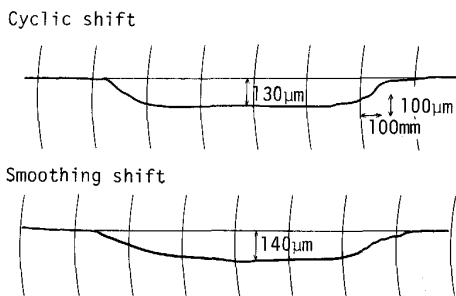


Fig. 7. Comparison of work roll profile after rolling by using different shift mode.

ここで  $I_i = I_{next} + K \cdot I_{future}$  とし、両者を合成する際に重み係数  $K$  を調節することにより、現在の WR プロフィールと未来の WR プロフィールの両者を考慮する重みを変えられるようにしている。Fig. 7 は、ほぼ同等の圧延スケジュールにおいて、従来の周期的シフト制御とこの WR プロフィール平滑シフト制御を適用した場合の、圧延終了後の WR プロフィールを比較して示したものである。WR プロフィール平滑シフト制御の適用により、WR プロフィールが良好になつていくことがわかる。

3.4 製鋼-熱延同期化システム

3.4.1 同期化操業とその課題

従来の圧延スケジュール編成作業では、すべての HCR 材をスラブヤードにストックした後、圧延上の各種制約条件を満たすように再編成する方法のため編成者にとっては時間的余裕があつた。しかし HCR 材を最も効率的に利用するためには、輸送されてくる HCR 材を極力スラブヤードにストックすることなしに加熱炉に装入することが重要である。そのため錯綜した物流を監視しながら圧延上の各種制約条件をリアルタイムに判断していくことが必要になるが、編成者にとっては極めて困難な作業となる。

そこでスケジュール編成作業の自動化を主な目的とした製鋼-熱延同期化システム<sup>11)</sup>の開発を行った。

3.4.2 システムの特徴

1) 鑄込み-圧延操業計画機能

鑄込計画時点の熱延到着予定順コイル厚み・コイル幅などの移行を 1 本ごとにチェックできる機能をもつ画面

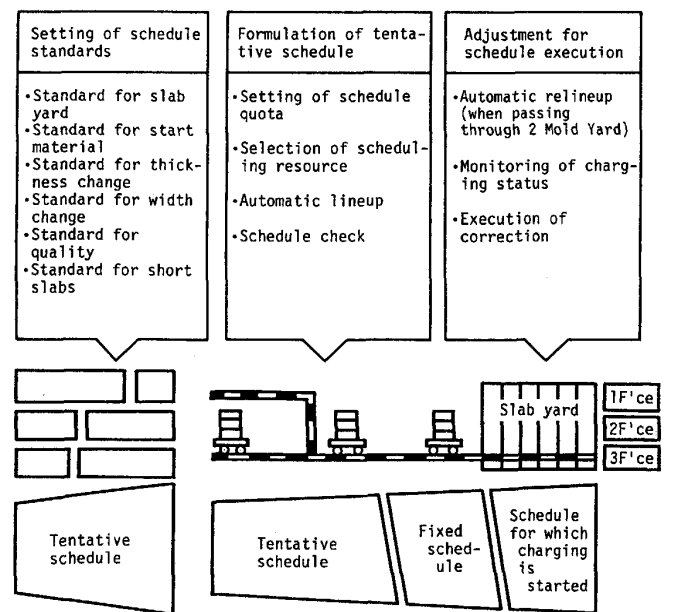


Fig. 8. Configuration of automatic scheduling system.

を作成し、出鋼や鋳込計画にフィードバックして最適化を行つている。

2) オートラインナップ機能

本システムの構成を Fig. 8 に示す。あらかじめ設定しておいたスケジュール標準を考慮しながら貨車の到着タイミングに合わせて貨車単位にスケジュールを小刻みに自動作成してゆくものである。

スケジュール標準の主なものは以下に述べるものである。

(イ) 幅逆転移行規制

圧延可能幅を 50 mm ステップに区分したテーブルにスケジュール確定材の圧延距離を該当する区分へ加算していき、圧延時のロール摩耗状態を知るパラメーターとして後述する N1~N4 の値と比較して幅逆転の可否を判定するもので Fig. 9 はその概要を示している。

N1: 各区分の加算値がすべてこの値よりも小さいときはロール摩耗はほとんど進行していない状態であり幅

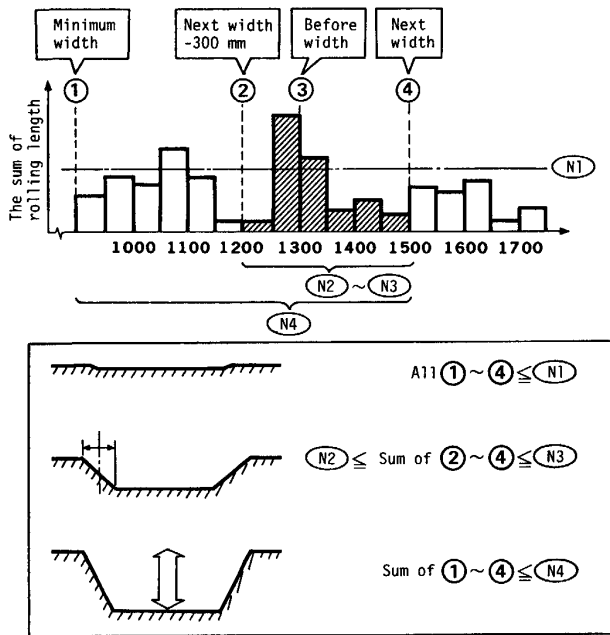


Fig. 9. General idea of width reversal from narrow to wider.

逆転を認める。

N2: ある程度圧延が進行した後では、逆転材幅(图中④)とシフトによる摩耗平滑可能量をさし引いた幅(②)との間の各区分の圧延距離合計がこの値以上であれば摩耗は平滑化された状態であり、幅逆転を認める。

N3: N2 の上限値でロールのならし面が急峻な状態であり、幅逆転を認めない。

N4: さらに圧延が進行した後では、全摩耗量が大きくなっておりクラウン形状そのものが悪化するおそれがあり幅逆転は認めない。

以上のような N1~N4 (単位は km) を Fig. 10 に示すように、厚み・幅・TS・幅逆転量別にテーブル値として設定している。

(ロ) 厚み移行規制

前材厚みと次材厚みとの移行可否を厚みを数区分に分けたマトリックス中で判定できるように設定している。

(ハ) 品質上規制

規制内容は a) 組込位置を規制するもの b) 複数の材質間の相互の圧延順序を規制するもの c) ロール肌荒に対する肌の回復を必要とする場合の規制の三つに大きく分類している。

3) 炉別ミックス機能

HCR 材の鋳込状況に応じて複数の炉をおのおの異なる性質の材料を振り分ける炉別ミックスを行うことで圧

MIN-MAX	リョク	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
01 - 44	050	04 003	- 060	120	04 003	- 060	120	04 003	- 050	090	04 003	- 050	080
	100	04 003	- 060	100	04 003	- 060	100	04 003	- 040	070	04 003	- 040	060
	200	04 003	- 050	090	04 003	- 050	090	04 003	- 040	060	04 003	- 040	050
	300	04 005	- 050	080	04 005	- 050	080	04 005	- 040	060	04 005	- 040	050
	400	04 005	- 050	080	04 005	- 050	080	04 005	- 040	060	04 005	- 040	050
	500	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010
	600	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010
45 - 99	050	04 003	- 060	120	04 003	- 060	120	04 003	- 050	090	04 003	- 050	080
	100	04 003	- 060	100	04 003	- 060	100	04 003	- 040	070	04 003	- 040	060
	200	04 003	- 050	090	04 003	- 050	090	04 003	- 040	060	04 003	- 040	050
	300	04 005	- 050	080	04 005	- 050	080	04 005	- 040	060	04 005	- 040	050
	400	04 005	- 050	080	04 005	- 050	080	04 005	- 040	060	04 005	- 040	050
	500	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010
	600	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010	04 999	- 999	010

Fig. 10. Standard for width change.

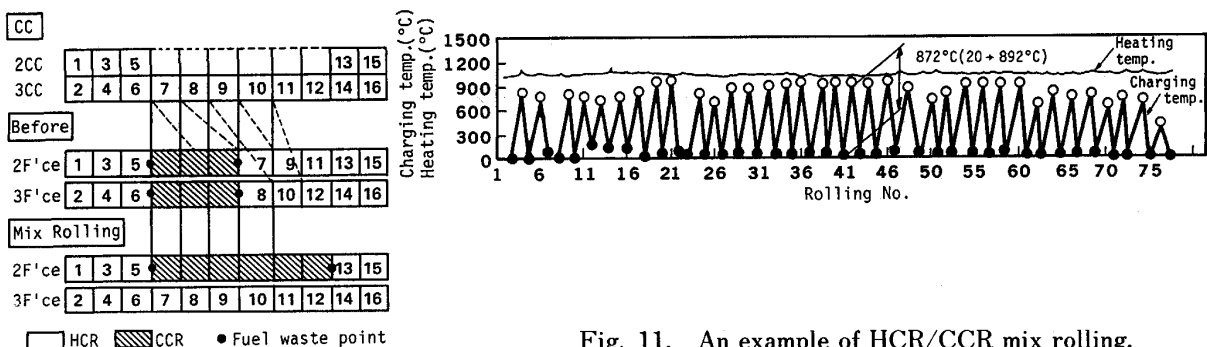


Fig. 11. An example of HCR/CCR mix rolling.

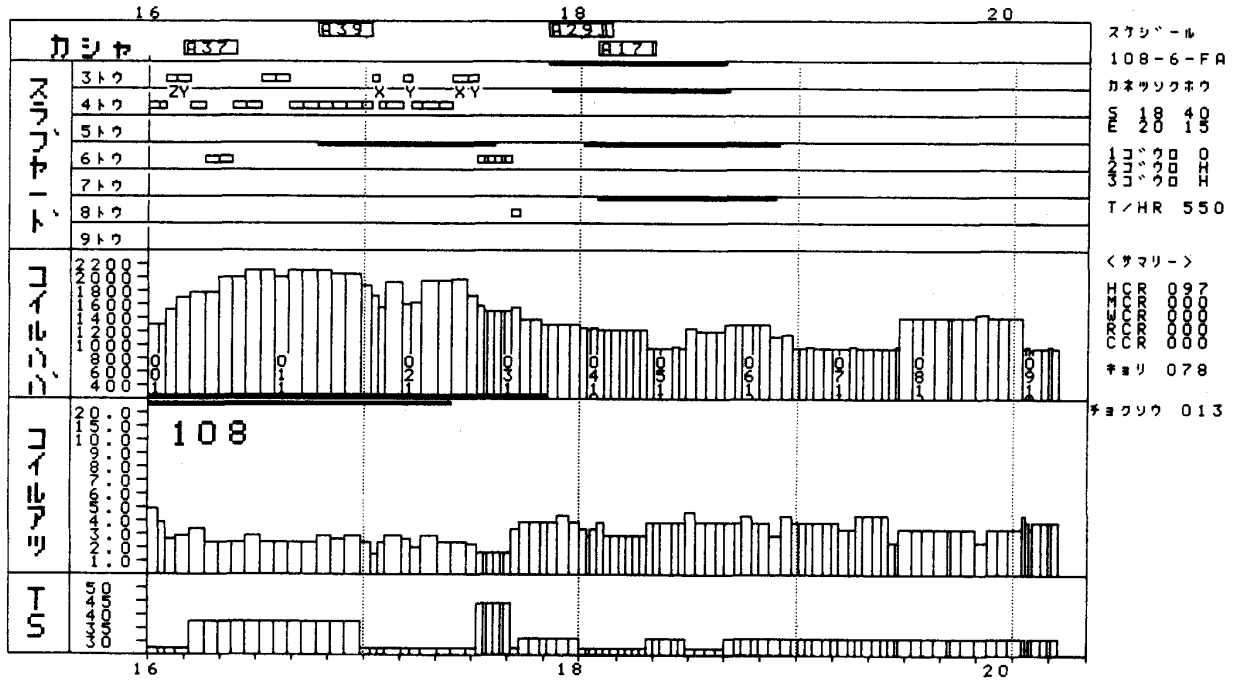


Fig. 12. An example of hot schedule progress.

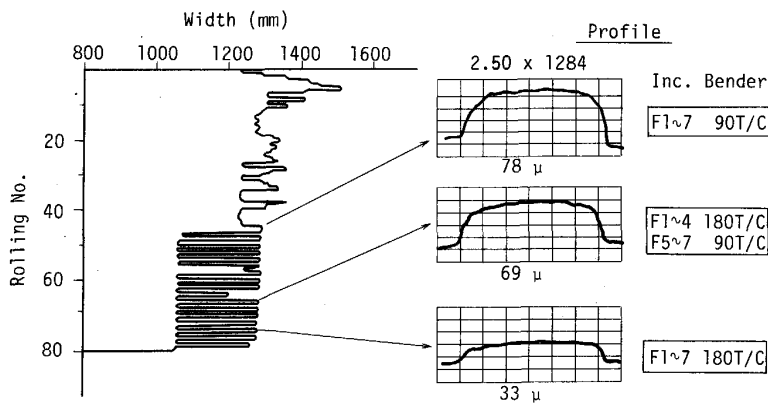


Fig. 13. Examples of strip profiles in a SFR schedule.

延能力を維持しつつ HCR 材の効果を発揮させるものである。

(イ)HCR/CCR ミックス

Fig. 11 は概念と実施例を示したものであり、連鑄機の時間当たり生産量 (以下 t/h) < 熱延 t/h の場合に片方の炉に HCR 材を装入し、一方の炉に冷片材 (以下 CCR 材) を装入することで t/h マッチングを図り HCR 材の装入温度を大幅に向上させ、HCR と CCR の切替え時のむだ焼けを減少させることができる。

(ロ)抽出温度ミックス

連鑄機別に抽出温度の異なる材料を出片する場合に、炉別に抽出温度の異なる材料を振り分けることで装入温度の向上とむだ焼けを減少させることができる。

4) トラッキング機能

上述の諸機能と実時刻の進捗状況を視覚的にとらえる

ことで迅速な対応が可能となる。従つて Fig. 12 に示すように大画面 G-CRT に諸情報を表示し、コイル 1 本ごとの実績更新を実時刻で行い、その監視を行っている。

3.4.3 管理体制

熱間の物流および調整機能を集中させた集中管制センターを新設し、製鉄～熱間工場を一元的に管制できるようにした。これにより工程間の諸調整のタイムラグが縮小され、円滑な管理が実現できている。

4. スケジュールフリー達成状況

以上述べてきた SFR 対応技術の開発により、幅 400 mm までの幅逆転を標準化した。Fig. 13 はその 1 例として、幅逆転スケジュールの幅移行および板プロフィールを示すが、幅逆転時にもハイスポットの発生が見られない。また、スケジュールの後半においても、WR ベンダー

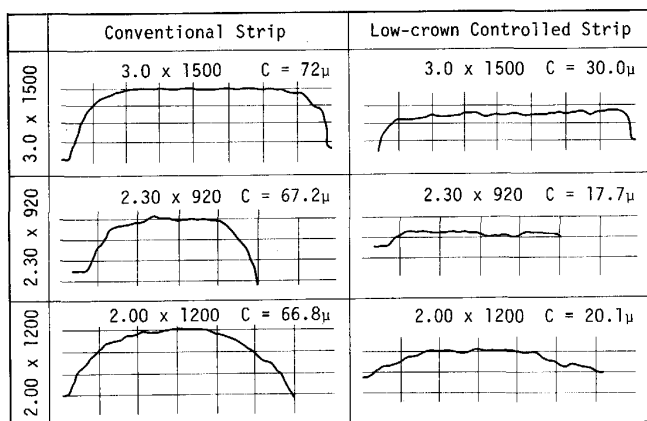


Fig. 14. Examples of conventional strip and low-crown controlled strip.

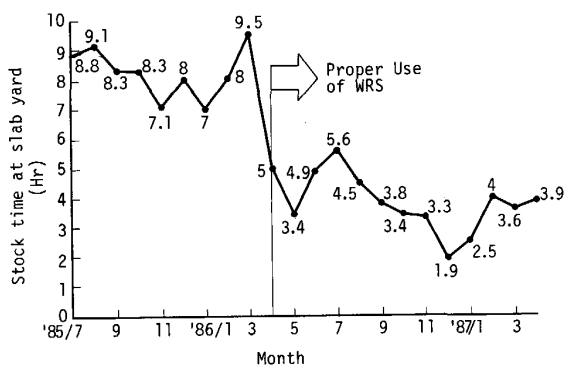


Fig. 15. Improvement in stock time of HCR slab at slab yard.

を強力バンダーに改造し NBCM と組み合わせていることにより、2.50 mm x 1284 mm のサイズで 33  $\mu$ m という低クラウンが達成されている。Fig. 14 に示すように他のサイズについても、成品のクラウンは従来の 1/2 ~ 1/3 に減少し、20 ~ 30  $\mu$ m 程度の低クラウン材の製造など多様なユーザーからのクラウン要求にも対応可能となった。

Fig. 15 は、HCR 材のスラブヤード滞留時間の推移を示したものであるが、WRS 化改造による幅移行制約

の大幅な緩和により、スラブヤード滞留時間も大幅に減少し、当初目標とした 3 h まで到達した。

### 5. 結 言

既設ミルの SFR 対応化改造に際し、NBCM と強力 WR バンダーを全スタンドに適用しクラウン制御を行い、後段スタンドに WRS を適用し幅移行制限の規制を緩和し、両者の組合せにより SFR を実現する、効率的かつ画期的なミル群を開発した。結果として、

1) HCR 材の加熱炉装入温度の向上による燃料原単位の低減

2) 低クラウン材の安定製造による板厚精度の向上など、コスト・品質両面において、君津製鉄所熱延工場の体質強化に大きく寄与している。

今後さらに、各種制御モデルのレベルアップにより、SFR 技術のいつそうの向上を図り、きたるべき DHCR (Direct Hot Charge Rolling) 時代に対処していきたい。

### 文 献

- 1) 野本昭継, 細見紀幸, 本郷政信, 北尾 聡, 徳長幹恵, 本田知己: 鉄と鋼, **70** (1984), S1099
- 2) 渡邊英一, 本郷政信, 西本正則, 徳長幹恵: 塑性と加工, **23** (1982), p. 1139
- 3) 高島義昭, 鎌田章博, 寺川雅智, 平世和雄, 木崎皖司, 江森 隆, 本城 恒, 原 勉: 石川島播磨技報, **19** (1979) 3, p. 133
- 4) 菊間敏夫, 藤田紀久, 薮田俊樹, 小森俊昭, 西村和夫, 松本紘美: 鉄と鋼, **68** (1982), S1120
- 5) 平石勇一, 鳥津 智, 相曾俊晴, 高島義昭, 野辺太久郎, 松本紘美: 鉄と鋼, **72** (1986), S333
- 6) 川並高雄, 松本紘美: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 348
- 7) 小川 茂, 松本紘美, 浜渦修一, 菊間敏夫: 塑性と加工, **25** (1984), p. 1034
- 8) 細見紀幸, 徳長幹恵, 小川哲也, 貝塚 洋, 渡辺重雄: 鉄と鋼, **72** (1986), S334
- 9) 貝塚 洋, 湯井勝彦, 渡辺重雄, 中島興範, 小川哲也: 鉄と鋼, **72** (1986), S335
- 10) H. KIMURA: Perfect and subperfect regulation in linear multivariable control systems, Automatica, **18** (1982) 2, p. 125
- 11) 笠井 勝, 小森繁之, 柴田正司, 山田陸男, 石川幸男: 鉄と鋼, **72** (1986), S1124