

討21

厚板新制御圧延プロセスにおける冷却設備と鋼板の形状制御

新日本製鐵 本社 中村秀夫 君津製鐵所 柳原英矩 檜崎誠治
設備技術本部 加藤正夫 中央研究本部 有吉敏彦

1. 緒言

CLCプロセス(Continuous On-Line Control Process)はその前工程である製鋼工程, スラブ処理工程を含めて合金元素を最も有効に活用し, 厚板圧延条件とそれに引き続く冷却条件を制御して厚板の特性を造り込む一貫プロセスであると定義している。¹⁾そして圧延後の水冷がその主要工程であり, TMCP法の一種でもあるという位置づけになっているが, この詳細についての説明^{1)~4)}は此处では省略する。

此处ではCLCプロセスを前提にした, 厚板圧延機の後面に設置する冷却設備についての考え方と検討結果を示した。また鋼板の形状制御については君津製鐵所の設備を例に, その考え方, 付与した機能, 実績などを紹介した。材質面の考慮はこれらの検討に必要最小限のものに絞った。

2. 冷却設備についての検討項目

考慮すべき項目を機能展開図の形で図1に示す。すなわち
1.与えられたプロセス条件が満足されること。2.冷却の均一性, 再現性が確保できること。3.鋼板の平坦度の確保が容易なること。4.建設コスト, ランニングコストが安価なること。5.ミルの生産性(能力, 歩留など)が損われないこと。とまとめることができる。図1から分ることは, 項目としては矛盾するものが多く, 検討にあたってのミルのローカリティ(プロダクトミックス, 温度工程能力など)に対する配慮の必要性である。

(1) 冷却設備の設置箇所

圧延機の後面に設置することはプロセス的に定められたことであるが, HLの前面か後面かの検討結果を表1に示す。

(2) 冷却方式

設備の中に鋼板を入れ一斉に水を出して冷却する同時冷却方式とRQのように予め水を出してある設備の中に鋼板を送り込む通板冷却方式の2つに大別される。両者の評価を表2に示す。

(3) 冷却設備の型式

大別すると熱延工場のランナウトテーブル上にあるような開放型, 厚板工場なじみのRQのような或いはフランスUsinor/Dunkerque

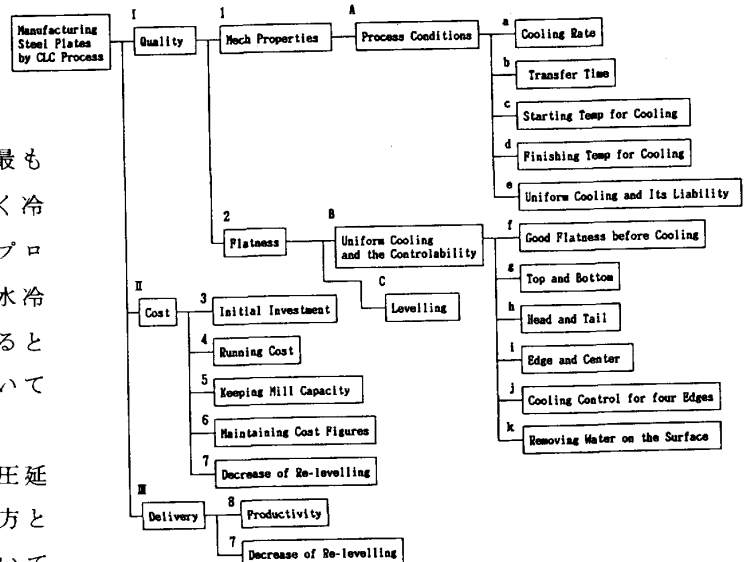


Fig.1 Schematic diagram of functions for considering the cooling equipments

Table 1 Comparison of the cooling equipment

*1	before the HL		behind the HL
	near the mill	near the HL	
b, c	○	○	△
e	△	△	○
f	△	△	○
C #	○	○	△
5	△	○	○

(Remarks)
1. # in the case the HL has enough levelling capacity
2. *1 : in the case of the cooling equipment's location
3. *2 : items in FIG.1
4. ○ : superior to others. △ : inferior to others

Table 2 Comparison of cooling method

* /	simultaneous cooling	continuous cooling
h	○	△
3 #	△	○

(Remarks)
1. * : items in FIG.1
2. ○ : superior to others.
△ : inferior to others
3. # in the case the same length plates are handled.

Table 3 Comparison of type of cooling equipment

* /	open type	closed type
d	△	○
e	△	○
i	△	○
k	△	○
3	○	△
4	○	△

(Remarks)
1. * : items in FIG.1
2. ○ : superior to others.
△ : inferior to others

の厚板工場で稼動しているRAC⁵⁾のような拘束型になる。拘束型としてなじみなRQ型を主にして両者を評価すると表3のようになる。

(4) 冷却設備本体

設備本体に要求される機能は、

1. 冷速の再現性と制御性
2. 均一冷却の確保（表裏方向，幅方向，長さ方向，偏冷却防止，水切り）

が基本であり，この効果をより発揮させるための制御モデル

3. 温度予測モデル
4. 形状制御モデル

と，電算機による制御が可能であるような細かい工夫を付加することが通常である。

具体的にはノズル選定，ノズル配列，幅および長さ方向のゾーン分割，水切り装置，四周偏冷却防止装置などであり，また設備の整備上の工夫である。

3. CLCプロセスにおける冷却設備

此処では君津製鐵所の設備（S58.11稼動），名古屋製鐵所の設備（S59.11稼動予定）の例を主体にその考え方を紹介する。

(1) 冷却設備のイメージ

設置場所については，CLCプロセスによって製造する各種厚板の製造条件，此処では特に冷却開始温度がミルから冷却設備までの温度降下量を考慮しても確保が可能であり，十分に目標とする材質を得ることが可能であることを確認したので，熱間矯正機の後面に設置することにした。図2に50HTのトランスファタイムと材質の関係の1例を示す。この配置により，冷却前の形状を平坦にし均一冷却を容易にしたものである。

冷却方式としては通板冷却方式を採用した。長さ方向の温度偏差という点では不利であるが，図3に示すように途中加速通板方式を導入することにより大幅に改善されることから，設備がコンパクトで且比較的制御が簡単なこの方式にした。これによって矯正機との連動も可能となった。

(2) 拘束型通板冷却式冷却設備

具体的な設備のイメージは，厚板工場でなじみのRQ型の冷却設備であるが，オンライン設備であり，冷速は緩冷から急冷まで，冷却終了温度の制御，通板速度が大きいなど，従来設備とは異なる操業条件が付加されるので，この点に関して十分なる配慮をはらった。

若干詳述すると，オンライン設備ということから，特にノズルのメンテナンスのための工夫を加えた。また圧延後直接冷却するために，圧延時および圧延後の温度偏差の影響を覚悟せざるを得ず，装置的に四周偏冷却防止対策をとった。

冷却速度の広範囲の制御が要求されるので，制御範囲をもつフラットスプレインノズルを採用，高低2段のヘッダーを設置すると同時にDQを意識して設備前段にスリットジェットノズルを装着，システム全体の水量を有効に活用するような配慮を加えた。また広範囲に冷却速度を制御する中での冷却の均一性と再現性を確保するため

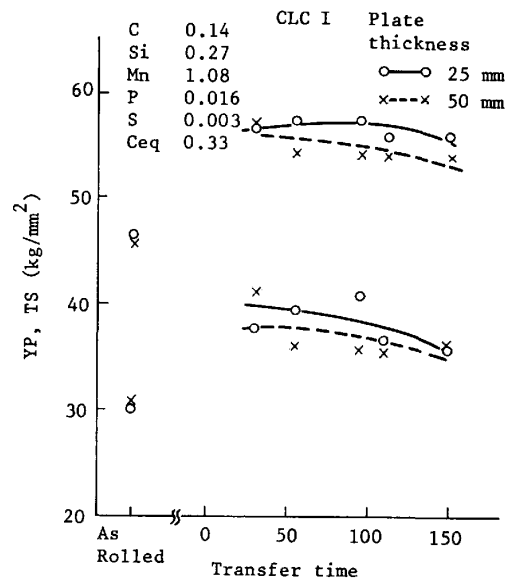


Fig. 2 Relation between YP, TS and transfer time

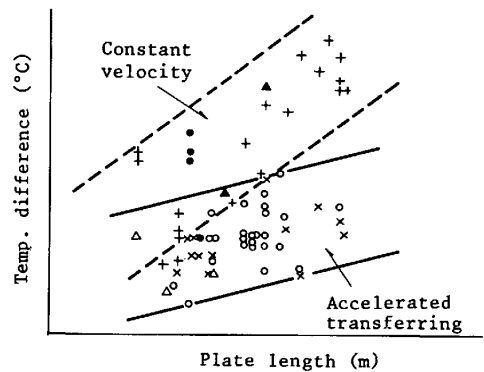


Fig. 3 Temp. difference for length direction

に、拘束型の特長を生かして上ロールに水流制御装置の役割をもたせ、同時にノズル配列に工夫を加えた。

冷却終了温度を制御するために、拘束型通板冷却方式の長所を生かした水切りの徹底、短所を改善するための途中加速通板方式を導入した。

なお、圧延直後水冷を実施することから加熱圧延工程における操業のバラツキを前提にせざるを得ず、これに対する配慮が必要である。バラツキ減少への努力は操業管理の一貫として当然なされるわけであるが、同時に前工程の結果をフィードフォワードし、これを有効に活用するために温度予測モデルを導入、形状制御モデルともどもプロコンにてオンライン制御を実施している。

(3) 君津製鐵所のCLC冷却設備

レイアウトを図4に、主要仕様を表4に示す。

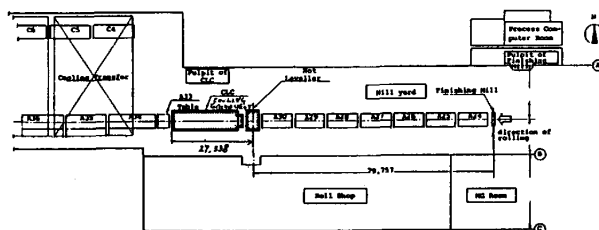


Fig. 4 General layout

4. 鋼板の形状制御とその実績（君津製鐵所の例）

鋼板の形状を考える場合、製造側として留意すべき点は2つある。1つは出荷時の大板の形状であり、今1つは大板を小切り（特に条切り）したあとの鋼板の形状である。これらは何れも水冷およびその後の冷却に伴う鋼板内部の残留応力によるものであり、その過程に大きく影響される。但し前者については形状を損わぬ範囲での残留応力は許容されるが、後者においては条切りされる範囲での応力差が結果的に鋼板の反り或は曲り（キャンバー）として発生する。したがって制御の点からは後者がきわめて厳しい。当然ながら冷却前の形状すなわち圧延形状が良好であれば、それだけ有利であることは言をまたない。

(1) 形状制御の考え方

水冷およびその後の冷却過程において発生する残留応力は、1つには冷却時の変態の差によって発生し、今1つには温度差によって発生する。また冷却前の温度差が少なく、終了後の温度差が少ない程有利である。入側温度偏差が出側で助長されるのは温度による熱伝達係数に差のあることから理解でき、入側温度偏差の減少がポイントである。

板厚方向には物理的に制御不能であるが、表裏の制御は可能であり、従来からRQでは上下水量差をつけることにより全体の反りを制御していた。今回もこの考え方を導入している。

鋼板の長さ方向の温度偏差は、板幅と板長さの関係から形状に与える影響は少なく、幅方向の温度偏差が重要である。すなわち幅方向の温度制御が今1つのポイントである。

また圧延直後の冷却であるので、鋼板の頭部および尾部、そして両端部の非定常部の偏冷却防止がきわめて大切である。このためにエッジマスク、H-Tマスク装置を導入、制御している。

一方、冷却の再現性およびそれによる材質のバラツキの減少、ひいては作業の安定による形状の確保という観点からは、板間の温度バラツキの減少（開始および終了温度）が重要である。入側については加熱圧延作業のバラツキの減少を、出側については学習制御の導入をはかっている。

(2) 大板の鋼板形状とその制御

鋼板の形状制御に関しては、圧延形状の研究がすすんでおり、厚板圧延についても既に発表されている。この考え方は幅方向プロファイルの不整合によって発生する長さ方向応力が座屈限界を越えると形状が損われるというものである⁶⁾。此処ではプロファイルを変態の発生ずれおよび温度偏差と置き換えて考えることにした。

Table 4 Main specification

Material handled	8-100t×1000-4620w ×3000-38000ℓ mm
Line threading speed	15-150 m/min
Cooling water amount	max.190 m ³ /min
Type	Closed type for all zone
Cooling zone length	19.8m. 6zone
Cooling rate (25mm 800-500℃)	10-30 ℃/sec in AC 35℃/sec in DR
Computer control function	Selection of cooling zone Setting of water amount Table speed control Edge mask setting Head-tail mask setting Plate int. temp. calculation Temp. learning control

今、 σ_c : 臨界座屈応力, h_p : 板厚, b : 板幅, l : 板長さ,

E_r : σ / ϵ (すなわちリデューストモデュラス)

とすれば

$$\sigma_c = K \cdot A \cdot E_r \cdot (h_p / b)^2 \quad (1)$$

で与えられる。此処でAは応力パターンによる常数, Kは l/b に関する常数($l/b > 2$ なればほぼ一定値)。

すなわち発生する応力が(1)式の σ_c を越えなければよいということである。しかし実際的にはこれを定量的に計算することは困難で、したがって可能な限り作業のバラツキをおさえ、その中での最適条件を求めることが現実的である。この観点から前述の設備配置, 設備本体を採用しているが, エッジマスクを有効に活用することによって良好な形状の確保が可能になった。図5に冷却終了後の幅方向の温度プロファイルの例を示す。

(3) 条切り形状

一般的には条切りによる残留応力の分布差によりキャンパーが発生すると考えることができる。

今、 δ : キャンパー量, $\Delta\sigma$: 残留応力差, Δb : 条切幅,

l : 板長さ E : ヤング率

とすれば

$$\delta = \Delta\sigma \cdot l^2 / 8 \cdot E \cdot \Delta b \quad (2)$$

で与えられる。キャンパー量を(2)式から計算すると表5のようになる。許容される応力差の小ささに驚かされる。また単純な熱応力計算で温度差から残留応力を推定すると $\Delta\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$ で与えられるので, $\Delta\sigma = 2 \text{ kg/mm}^2$ for $\Delta t = 6.3^\circ\text{C}$, $\Delta\sigma = 5 \text{ kg/mm}^2$ for $\Delta t = 15.9^\circ\text{C}$ となる。従ってキャンパー量を減ずるためには厳しい温度制御が必要であることが分る。なお, 図6に条切りテスト結果の例を示す。

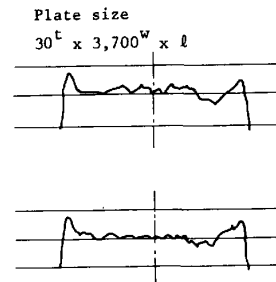


Fig. 5 Effect of edge mask (Temp. distribution of plate width)

Table 5 Calculated values of plate camber (mm)

Residual stress (kg/mm ²)	Plate Length (m)		
	10	15	20
2	3	7	12
5	7	17	30
10	15	33	60

(Remark) $\Delta b = 400 \text{ mm}$

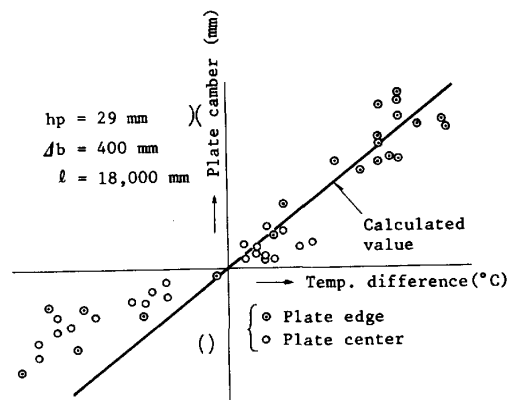


Fig. 6 Relationship between plate camber and temp. difference

5. 結 言

C L C プロセスにおける冷却設備に対する検討結果を記し, 君津製鐵所の設備とその鋼板形状制御の考え方, 実績を紹介した。冷却設備選定のポイントはミルのローカリティへの配慮であり, 鋼板形状制御のそれはエッジマスクの有効活用であることを明らかにした。

<参考文献>

- 1) 渡辺, 片上他: 日本造船学会誌 649 (1983), P374
- 2) 尾上, 梅野他: 製鉄研究 309 (1982) P14,411
- 3) 松田, 尾上他: 製鉄研究 310 (1982) P14,826
- 4) 森山: シンポジウムテキスト P 1, 東京 (1983年 11 月), 日本造船学会
- 5) J. Leclerc, C. Arnaud, et al.: Procs. Vol 2 Int. Conf. Steel Roll, P1,321 (1980) Tokyo, ISIJ
- 6) K.N. Shohet, N.A. Townsend: JISI 209 (1971), P769