

連鑄-熱間圧延の直結化における最適プロセス

谷口 勲*・内田 繁孝*・中島 正博*
山崎 喜政*・寺内 琢雅*・杉山 峻一*²

The Optimum Process on Continuous Casting and Hot Strip Mill

Isao TANIGUCHI, Shigetaka UCHIDA, Masahiro NAKASIMA,
Yoshimasa YAMAZAKI, Takumasa TERAUCHI and Syunichi SUGIYAMA

Synopsis :

The effect of Hot Direct Rolling (HDR) process and Direct Hot Charged Rolling (D-HCR) process between continuous casting and hot strip mill was studied by the simulate calculation and the real operation.

- 1) HDR process is superior in heat consumption to D-HCR process under the same ratio of these productions.
- 2) In D-HCR process, high-efficient furnace operation, for example using only one furnace is profitable.
- 3) HDR process in which the heating can be adopted in a short time and partially is superior in scale loss.
- 4) The temperature deviation of the strip in the rolling direction can be decreased by these process, and the effect of the quality's improvement such as the improvement of the accuracy about the dimension can be obtained.
- 5) Though the temperature profile in the width direction is a little different by the process, the fixed temperature for the quality is maintained in each process.

Key words : HDR ; D-HCR ; continuous casting ; hot strip mill ; heat consumption.

1. 緒 言

連鑄-熱延の直結プロセスとして、加熱炉へ高温鑄片を直接装入するダイレクトホットチャージローリング (D-HCR) 法、あるいは加熱炉を使用せずそのまま圧延を行ういわゆるホットダイレクトローリング (HDR) 法などが考案され、実施されている^{1)~3)}。

本報告では、各種直結プロセスについてシミュレーション計算および実設備を使用した操業テストに基づき、その得失について検討、評価を行った。

2. 連鑄-熱延直結化における要素技術

直結化に関して、いかなるプロセスを指向しても以下にあげる要素技術は必要不可欠である。すなわち、1) 無欠陥スラブ製造技術 2) 高温スラブ製造技術 3) ライン上スラブ温度降下防止技術 (保温技術) 4) 連鑄-熱延・生産性バランス対応技術 5) 連鑄-熱延・幅対応技術 6) 連鑄-熱延・一貫操業管理システム などで

ある。これら各要素技術に関しては既に報告^{3)~8)}を行っているので、本報告では、連鑄機出側以降のプロセスに関し検討を行った。

3. シミュレーション計算によるプロセス比較

Fig. 1 に鑄片高温化対策を施した連鑄機の鑄造直後のスラブ温度分布 (NKK 福山 No. 5 CCM の例) を示す。一般に連鑄機内では健全な凝固シェルを得るための冷却パターンにより不可避免的にスラブエッジ近傍の温度が降下し、主要な製品板厚において圧延仕上温度 (A_{r3} 点) が確保できないという問題が生じる。本来、連鑄機と熱延ミルを単純直結したプロセスが理想ではあるが、上記問題により何らかの熱補償設備を含んだプロセスが必要となってくる。

筆者らは、Table 1 に示す 4 ケースのプロセスについてシミュレーション計算により、燃料原単位面での検討を行った。Case 1, Case 2 はインライン加熱方式であり、それぞれガス燃焼方式、電気誘導加熱方式となっている。

昭和 62 年 10 月 19 日受付 (Received Oct. 19, 1987)

* NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*2 NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation)

Case 3, Case 4 は加熱炉方式であり, それぞれ炉長を 20 m, 40 m としたものである.

スラブ熱計算は二次元差分計算により行い, 燃料原単位の推定は, ゾーン法⁹⁾による熱収支計算および試験設備による試験結果 (境界条件, 燃料・電力消費率) によ

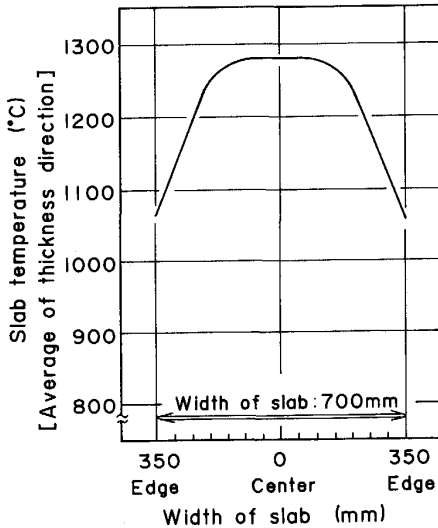


Fig. 1. Slab temperature after continuous casting with thermal rising technology.

り行った. また, 初期条件として連铸機出側スラブ温度は Fig. 1 を使用し, 加熱目標温度は製品板厚 2.3 mm において全幅にわたり圧延仕上温度 (A_{r3} 点) が確保できる温度とした. なお, 加熱炉排ガス熱回収効率は 60% とした.

Table 2 に熱計算結果を示す. Case 1, Case 2 のインライン加熱方式では, 連铸機出側スラブカッター直後に加熱装置を配置でき, このためスラブ後端を切断中にスラブ先端部を加熱できるという利点があり, Case 3, Case 4 の加熱炉方式と比べ, スラブ搬送中の放熱時間が短く加熱開始時のスラブ温度が高い. すなわち, インライン加熱方式は必要昇温量が小さくなる. また, スラブ全表面を加熱するいわゆる全体加熱を基本とする加熱炉方式に対し, インライン加熱方式は, スラブエッジ部の局部加熱, いわゆる選択加熱が可能であり, 本来, 加熱の不要なスラブ幅方向センター部を昇温することはない.

以上の結果, Case 1, Case 2 のインライン加熱方式は Case 3, Case 4 の加熱炉方式に比べ, スラブ全体の受熱量より求めたトータル熱効率では劣っているものの, 昇温の必要なスラブエッジ部の受熱量より求めた局

Table 1. Processes between CC and HOT.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Facility for heating	Inline heater		Furnace	
	Gas combustion heating	Induction heating	Furnace for D-HCR	Ordinary furnace
Length of facility	25 m	5.5 m	20 m	40 m
Cross section of facility				
Layout				

Table 2. Result of thermal calculation of processes.

Item	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Time to transfer from CC to furnace	5 min		15 min	
Maximum heat flux	$105 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$	$(210 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{hr})$	$100 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$	
Temperature of slab surface: 1000°C	$\alpha = 175 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ $T_s = 1600^\circ\text{C}$		$\phi_{CG} = 0.6$ $T_g = 1300^\circ\text{C}$	
Time for heating	4.8 min	2.5 min	37 min	73 min
Profile of slab temperature [Average of thickness direction]				
Thermal efficiency of slab edge (Edge 0~40mm)	5.0 %	5.6 %	3.8 %	3.3 %
Thermal efficiency of slab	11.0 %	2.2 %	3.7 %	3.2 %
Fuel consumption	$1850 \times 10^4 \text{ kcal/hr}$ $37 \times 10^3 \text{ kcal/T}$	6700 kWh/hr $(1700 \times 10^4 \text{ kcal/hr})$ $34 \times 10^3 \text{ kcal/T}$ (13.4 kWh/T)	$2350 \times 10^4 \text{ kcal/hr}$ $47 \times 10^3 \text{ kcal/T}$	$2750 \times 10^4 \text{ kcal/hr}$ $55 \times 10^3 \text{ kcal/T}$

所熱効率では優っており、その結果、燃料原単位面でも優位にたっている。

インライン加熱方式のガス燃焼方式 (Case 1) と電気誘導加熱方式 (Case 2) の比較では、燃料原単位の大きな差は認められなかった。

一方、加熱炉方式では炉長差がスキッド冷却損失、炉壁放散熱などの固定ロス分の差に現れ、Case 4 に比べ短炉長の Case 3 が燃料原単位面で優位となる。

なお、検討の際、加熱能率はすべて 500 t/h とし、電気誘導加熱での使用電力は発電効率を加味して熱量換算した。

4. 実作業テストによるプロセス比較

シミュレーション計算によるプロセス比較では、各プロセス単独における燃料原単位の比較を行った。しかしながら、一般には、連铸と熱延の操業形態、生産性の差異により新プロセス単独での操業は成立しにくく、冷片加熱 (CCR) または温片加熱 (HCR) を主体とした従来プロセスとの混成操業を行っているのが実態である。

ここでは実作業テストに基づき、連铸-熱延間の新プロセスについて、従来プロセスとの組合せを考慮した上で、燃料原単位の評価を行い、合わせて、各プロセスのスケールロス、操業条件など総合的な観点から検討を行った。

Table 3 に福山第5連铸機および第2熱延の主仕様を、Fig. 2 にそのレイアウトを示す。Fig. 2 に示すように、第5連铸機および第2熱延は直送圧延 (以下HDRと称す) を主体としたレイアウトを採用しており、同時に、連铸機からの加熱炉ダイレクトチャージ (以下D-HCRと称す) も可能な配置となっている。

実作業テストは、設備的、システムの可能なHDR、D-HCR各プロセスについて従来プロセスであるCCRとを組み合わせて行った。すなわち、シミュレーション計算におけるTable 1のCase 1, Case 4を対象に、Fig. 3 に示す3ケースを選定して行った。

Case A はHDRプロセス、Case B は#3加熱炉をD-HCR専用炉として運用、Case C は全加熱炉にD-HCRプロセス材を分散装入しCCR材との混在加熱を行う形態となっている。

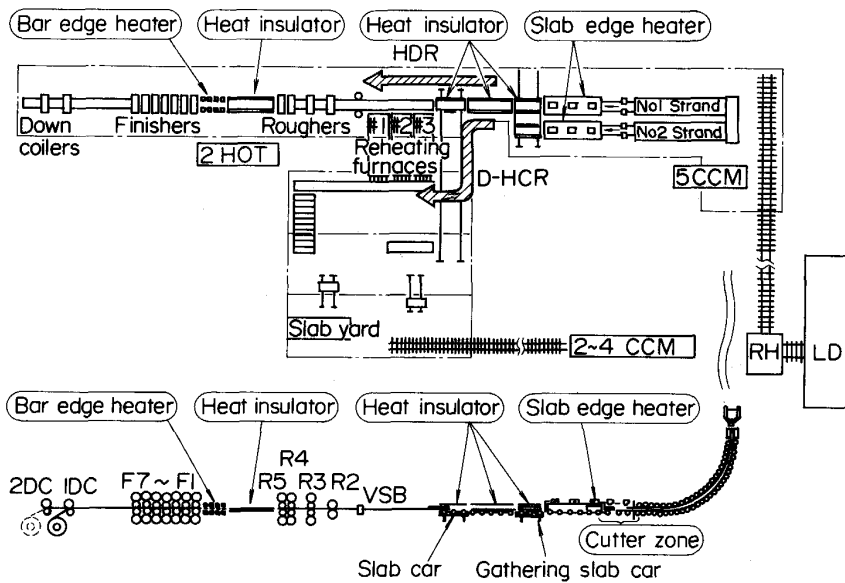


Fig. 2. Layout of Fukuyama 5 CCM and 2HOT.

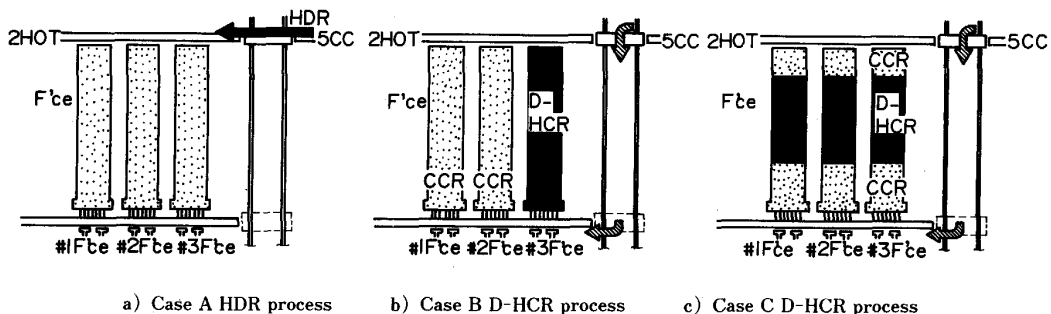


Fig. 3. Variable operation between CC and HOT.

Table 3. Specification of No. 5 CCM and No. 2 hot strip mill.

Facility	Specification
No. 5 CCM	Tundish capacity : 65 t Machine type : Vertical multi bending Strand size (mm) : 220t×(700~1 650)w×(5 900~14 500)l Casting speed : max. 2.5 m/min Machine length : 42 m
Slab edge heater	Type : In-line gas heating method Length : 32 m×2 strand
Heat insulator	Heat insulator inside of the CCM Heat insulator of transit table
No. 2 hot strip mill	Type : 70" full-continuous mill Coil size : (1.0~12.7) t mm×(600~1 630) w mm×30 t

なお、加熱炉は有効炉長 40 m、加熱能力 250 t/h (25°C→1 250°C 加熱)、熱効率 75% (25°C→1 250°C 加熱) のウォーキングビーム炉である。

実操業テストは各ケースとも連鑄-熱延直送材（以下プロセス材と称す）を連続して 900 t 組み込み、鋼種、製品寸法を統一し、連鑄におけるスラブ冷却条件、熱延操業条件は極力同一条件となるように操業を行った。

Case A の HDR プロセスでは、プロセス材はガス燃焼式のインライン加熱装置により加熱、熱延に直送され、Case B、Case C の D-HCR プロセスでは、インライン加熱装置を使用せずそのまま加熱炉へ直接装入される。

4.1 D-HCR 材の加熱炉装入温度 (Case B, Case C)

Fig. 4 に D-HCR 材の加熱炉装入までの表面温度推移を示す。D-HCR 材は、鑄造後、加熱炉装入までに約 16 min の時間を要し、表面の温度低下量が大きく、装入時のスラブ表面温度は約 850°C であった。

4.2 加熱炉操業条件

Fig. 5 に実操業テスト時の加熱炉燃料使用量、炉内温度、スラブ装入方法など加熱炉操業データを示す。

加熱炉へのスラブ装入方法として、Case A では HDR 直後の加熱炉材 (CCR 材) の過加熱防止のため、圧延スケジュールで HDR 直前の加熱炉材と HDR 直後の加熱炉材との間に各炉において 5 m のインターバルをとり、Case B では # 3 加熱炉を D-HCR 専用炉として位置付け、D-HCR 材前後を炉長分空炉として操炉した。また、Case C では D-HCR 材前後の CCR 材加熱による D-HCR 材の過加熱を防止するため、D-HCR 材前後にそれぞれ 10 m、5 m のインターバルをとった。

Case A は、Fig. 5 a) に示すように HDR 実施中には加熱炉燃料投入量はいわゆる計画休止における保熱状態まで低減が可能である。また、この保熱状態において、炉内装入側に在炉するスラブ (CCR 材) は徐々に昇温され、HDR 終了後の加熱炉操業において燃料投入量の

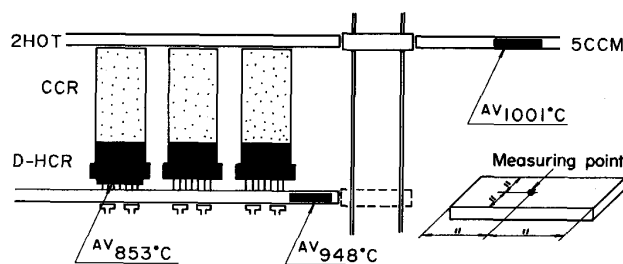


Fig. 4. Slab surface temperature (Case C).

節減が可能となっている (Fig. 5 a) の A 部)。

Case B は、Fig. 5 b) に示すように D-HCR 専用炉である # 3 加熱炉はその燃料投入量を大きく低減することが可能であり、また、# 1 および # 2 加熱炉の燃料投入量については、Case A の HDR 実施時の加熱炉操業とほぼ同一のものとなっている。

Case C は、Fig. 5 c) に示すように、各炉に D-HCR 材を分散させたため、1 炉当たりの D-HCR 材は 22 m と炉長に対し約 50% の比率となり、3 ケース中、燃料投入量の低減量およびその対象時間は最も少ない。また、CCR 材との混在加熱となっているため、D-HCR 加熱時に燃料投入量を低減した分、後続の CCR 材の昇熱不足が生じ、D-HCR 抽出後に従来 CCR 材加熱以上の燃料投入が必要となっている (Fig. 5 c) の C 部)。

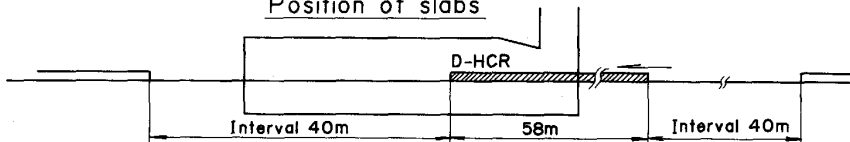
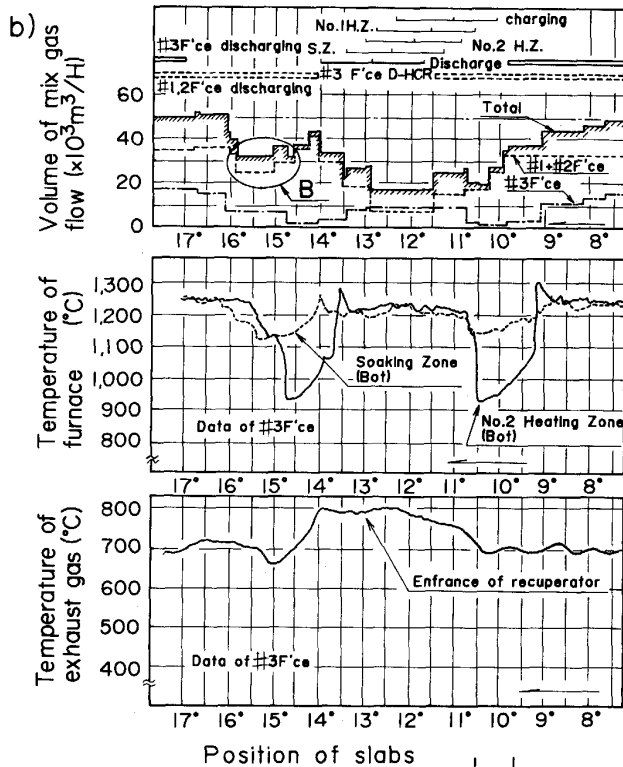
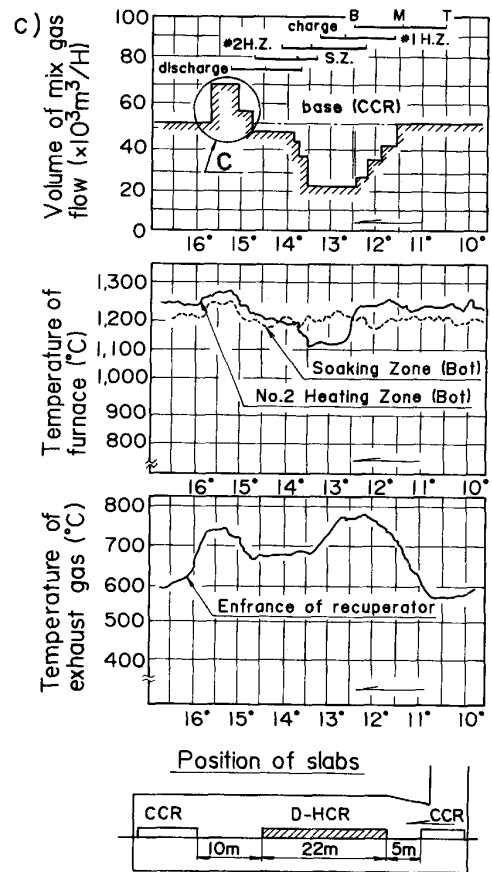
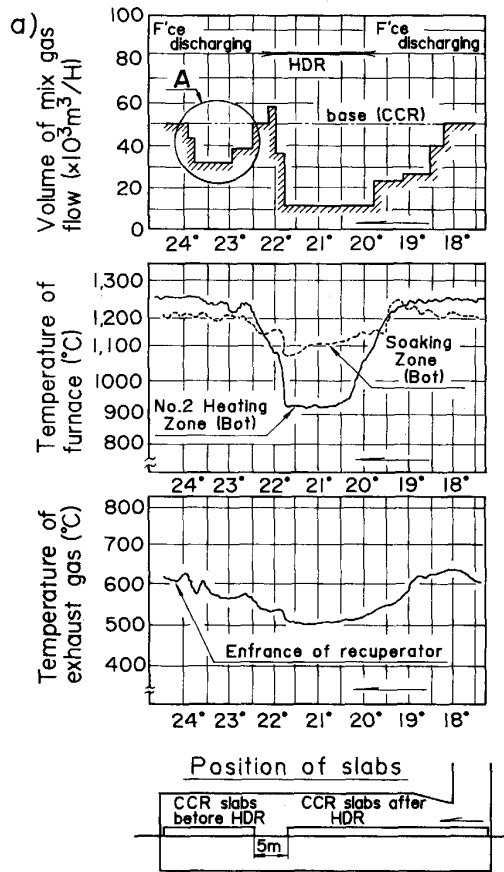
また、Case B、Case C の D-HCR プロセスでは、D-HCR 材装入に伴い、排ガス温度の顕著な上昇が見られた。

Fig. 6 に、Case B、Case C の D-HCR プロセス材の加熱炉内における昇温特性、各帯の燃料投入配分を CCR 材と比較して示す。一般に、CCR 材では、スラブ加熱温度均熱化のため、最抽出側の均熱帯では昇温量を大きくとれず、加熱帯までの燃料投入を大きくとり、均熱帯入側で、ほぼ抽出温度に近い温度まで昇温を行っていた。これに対し、D-HCR 材では、加熱炉への装入段階でスラブの内部温度は、必要抽出温度以上となっており、CCR 材に見られるスラブ加熱温度均一化を目的とした燃料投入は必要なく、均熱帯において、昇温量を大きくとれる昇熱曲線が可能となっている。

4.3 各プロセスの燃料原単位

各ケースの燃料原単位はプロセス材 (HDR または D-HCR) 前後に圧延される非プロセス材 (CCR 材) への影響も考慮し評価した。

Table 4 に各ケースの燃料原単位結果を示す。Table 4 において、燃料原単位は、



a) HDR process (Case A)
 b) D-HCR process (Case B)
 c) D-HCR process (Case C)
 Fig. 5. Furnace operation.

- ①プロセス単独の場合の燃料原単位
 - ②加熱炉の休止保熱の生じるケース (Case A, B) については、加熱炉保昇熱原単位
 - ③前述したプロセス材による加熱炉操業変動に伴う後続の非プロセス材への燃料原単位影響分 (Fig. 5 a), b), c) 中の, A, B, C 部) に区分して示し, これらすべての項目を考慮した総括燃料原単位を算出し, 示した.
- なお, 各ケースにおいて, プロセス材と非プロセス材

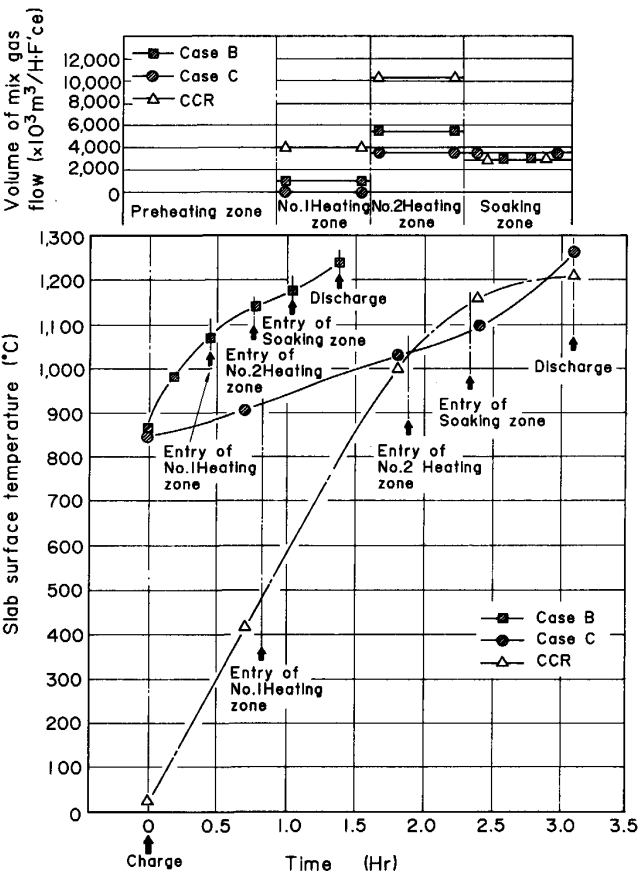


Fig. 6. Slab temperature in furnace.

の生産比率は 1 : 1 として, 燃料使用量実績を補正して各燃料原単位を求めた.

Table 4 より, プロセス単独でみた場合の燃料原単位は, Case A の HDR プロセスが最も良好であり, 次いで Case B の D-HCR プロセス (専用炉方式) の順となっている.

一方, 加熱炉保昇熱原単位は, 加熱炉非抽出時間の正味燃料使用量より求め, その結果, 保熱炉数の差により, Case C → Case B → Case A の順で悪化していく.

いずれのケースにおいても, 前述したように加熱炉は保昇熱または被加熱物装入温度の大きな変動により, 非定常な操業を強いられ, その結果プロセス材の直後に圧延される非プロセス材は, 加熱段階においてその影響を少なからず受けている. すなわち, Case A および Case B の加熱炉休止が発生する場合には, その影響は燃料節減方向に作用し, Case C では, 逆に燃料増の方

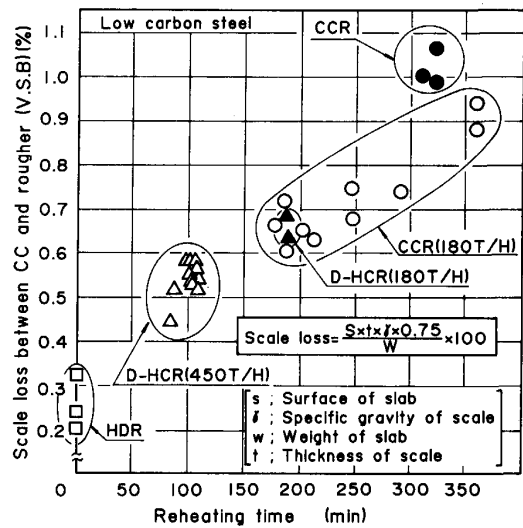


Fig. 7. Relationship between scale loss and reheating time.

Table 4. Fuel consumption of processes.

Process between CC and HOT	Case A	Case B	Case C	—
	HDR	D-HCR	D-HCR	CCR
Efficiency	450 t/h·CC	450 t/h·F'ce	180 t/h·F'ce	180 t/h·F'ce
Charging temperature (Slab surface)	—	930°C	948°C	25°C
①Fuel consumption of process proper	48×10 ³ kcal/t·HDR (Slab edge heater)	81×10 ³ kcal/t·D-HCR (#3 F'ce)	107×10 ³ kcal/t·D-HCR (#1, #2, #3 F'ce)	270×10 ³ kcal/t·CCR
②Fuel consumption during F'ce downtime	74×10 ³ kcal/t·HDR (#1, #2, #3 F'ce)	53×10 ³ kcal/t·D-HCR (#1, #2 F'ce)	—	—
③Influence on the normal F'ce material	Δ55×10 ³ kcal/t·CCR (#1, #2, #3 F'ce)	Δ37×10 ³ kcal/t·CCR (#1, #2 F'ce)	8×10 ³ kcal/t·CCR (#1, #2, #3 F'ce)	—
All inclusive fuel consumption [HDR or D-HCR : CCR=1 : 1]	169×10 ³ kcal/t	184×10 ³ kcal/t	193×10 ³ kcal/t	270×10 ³ kcal/t

向に作用する。

以上の項目すべてを考慮した総括燃料原単位は、Case A の HDR プロセスが最も良好であり、次いで Case B の D-HCR 専用炉方式、Case C の D-HCR 全炉振り分け方式の順となっている。

4.4 各プロセスのスケールロス

省燃料とならび歩留り向上も直結化の大きなメリットのひとつである。なかでも、プロセスによるスケールロス(粗圧延機入側までに発生する1次スケールロス)の差は大きく重要な評価項目である。

Fig. 7 に各ケースにおけるスケールロスを在炉時間と対比させて示した。なお、スケールロスの算定は、各ケースにおいて、粗圧延機 (VSB) 直前にて採取したスケールサンプルの比重、平均厚み、Fe 重量% を測定し、Fig. 7 内に示す換算式により求めた。

Fig. 7 において、スケールロスは、短時間局所加熱を行う Case A の HDR 方式が最も良好であり、次いで加熱時間の短い Case B の D-HCR 専用炉方式、Case C の D-HCR 各炉振り分け方式の順となっている。

4.5 各プロセスの圧延温度挙動

各ケースにおいて、粗圧延機前までの加熱、放熱など

の熱的条件、および搬送方法の差異により、圧延開始時のスラブ温度はそれぞれ特有の形態を有する。

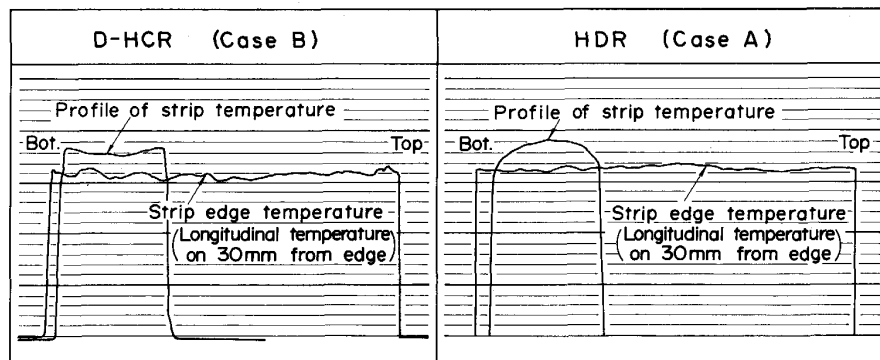
Table 5 に各ケースにおける被圧延材の長手方向温度分布(粗圧延機出側)を示す。Case A の HDR 方式では、インライン加熱方式を採用しており、加熱時の材料搬送をローラーテーブルにて連続して行うため、被圧延材の長手方向温度偏差はほとんど生じない(ただし、複数ストランドを熱延への搬送テーブルへ集合する集合台車上での停止、また、ガス切断により生じたバリを除去する際の停止により、若干の温度偏差が不可避免的に生じる)。これに比べ、従来型の加熱炉を使用した Case B, Case C の D-HCR 方式では、加熱炉スキッドによる温度偏差(スキッドマーク)が不可避免的に生じ、その量も Case A の HDR 方式より極めて大きなものになる。ただし、この場合でも従来の冷片加熱(CCR)に比べれば、同一加熱能率の場合、その量はかなり軽減される。以上のように直結化を行うことにより、圧延長手方向の温度偏差を減少することが可能であり、これにより、被圧延材の板厚精度、板幅精度向上など、品質面でのメリットが期待でき、特に HDR 方式ではその効果が大きい。

Table 6 に各ケースにおける被圧延材の幅方向温度分

Table 5. Deviation of temperature for each process.

Process	Case A HDR	Case B D-HCR	CCR	Case C D-HCR
Furnace efficiency	450T/Hr-CC	450T/Hr-F'ce	180T/Hr-F'ce	180T/Hr-F'ce
R5 outlet temperature (°C)				
Deviation of temperature	av 5°C	av 20°C	av 35°C	av 15°C

Table 6. Finishing temperature.



布（仕上圧延機出側）を示す。加熱炉を使用した D-HCR 方式では、被圧延材の幅方向温度分布は、加熱方式を反映して中へこみ形状となる。これに対し、加熱炉を使用しない HDR 方式では、基本的に鑄造直後の温度分布を踏襲した中高形状となつている。また、幅方向エッジ部の温度（エッジより 30 mm 点の長手方向温度）は、HDR 方式の場合、インライン加熱によりエッジ部の局部加熱を行い、加熱炉抽出材と同様の温度を確保している。以上のように直結化プロセスにおいて、各ケースごとにその幅方向温度分布には若干の差はあるものの、品質確保という面で見つた場合、すべてのケースにおいて、所定の温度が確保されていることがわかる。

5. 結 言

連鑄-熱延の直結化についてシミュレーション計算および実操業テストに基づき、その得失について検討、評価を行った。その結果、

- 1) 直結材比率が同一の場合、HDR 方式は D-HCR 方式よりも、燃料原単位面で有利である。
- 2) D-HCR 方式を採用する場合には、専用炉を設定し、高能率操炉を実施することが燃料原単位面で有利である。
- 3) スケールロス、短時間局所加熱を行える HDR 方式が最も良好であり、従来加熱炉を使用した D-HCR 方式と比べ顕著な差がある。

4) 直結化を行うことにより、圧延長手方向の温度偏差を減少することが可能であり、これにより、被圧延材の寸法精度向上など、品質面での効果が期待でき、特に HDR 方式ではその効果が大きい。

5) 直結化プロセスの形態により、幅方向温度分布に若干の差はあるが、品質確保という面では、HDR、D-HCR 方式すべてのプロセスにおいて所定の温度が確保されている。

などが確認できた。

文 献

- 1) 蜂谷整生, 浅野総一郎, 上川清太: 鉄鋼界, 7 (1983), p. 52
- 2) 竹村洋三, 溝口庄三, 椿原 治, 桑原達郎, 斉藤 実: 製鉄研究 (1982) 310, p. 251
- 3) 小谷野敬之, 寺田 修, 内田繁孝, 和田 勉, 田口喜代美, 小島達雄: 鉄と鋼, 71 (1985), S 156
- 4) 小谷野敬之, 内田繁孝, 瀬良泰三, 政岡俊雄, 森 孝志, 鈴木幹雄: 鉄と鋼, 71 (1985), S 157
- 5) 大西英明, 福喜多興二, 松村勝己, 江種俊夫, 石坂陽一, 小沢宏一: 鉄と鋼, 71 (1985), S 311
- 6) 谷口 勲, 中村丈人, 小土井章夫, 寺内琢雅, 河本安博, 牟田 潔: 鉄と鋼, 71 (1985), S 317
- 7) 神馬照正, 日高幸男, 小土井章夫, 出田忠臣, 寺内琢雅, 杉山峻一: 塑性加工春季講演会 (1984), p. 135
- 8) 小谷野敬之, 白谷勇介, 内田繁孝, 和田 勉, 小沢宏一, 森 孝志: 鉄と鋼, 72 (1986), S 265
- 9) 熱経済技術部会 (私信) 1982 年 11 月