

## スラブ連铸における厚板向け中炭素鋼の高速铸造技術

## High Speed Slab Casting of Middle Carbon Steel for Plate

(株)神戸製鋼所加古川製鉄所 江波戸紘一・松尾勝良・木村雅保  
上田 輝\*・谷川完士・自念 勝

## 1. 緒言

加古川製鉄所第4号連铸-2ストランド設備(以下、4-2CCと略す)は、高度化する品質要求への対応、ならびに納期短縮に向けたスラブ物流の合理化を目的として1992年1月に操業を開始し、Table 1に示すように連铸機の向け先別生産体制を実現した<sup>1)</sup>。当連铸機は加古川製鉄所における厚板スラブの連続铸造プロセスの確立を念頭に、Table 2に示す設備仕様により厚板用高品質スラブを高速で製造するマシンとして設計した<sup>2) 3)</sup>。従来から厚板スラブは成分設計面から割れ感受性が高く、また内部品質も厳格なことから高速铸造化が困難であったが今回、厚板中炭素鋼のS、およびLサイズにおいて低炭材並みの2.0m/分の高速铸造が可能となった。本報では、4-2CCにおける厚板中炭素鋼の高速铸造技術について報告する。

2. 高速铸造化の背景と冷却の設計思想<sup>4)</sup>

4-2CCは基本コンセプトとして、当所4-1CCと同様に歩留り、および製造コストに有利な1ストランドマシンを採用した。これに伴う生産性の低下を補うためには、铸造準備時間の短縮と共に、主要鋼種である厚板中炭素鋼の高速铸造技術の確立が必須となった。また、介在物の浮上に十分な2.95mの垂直部長さをもつ垂直曲げ型(以下V-Bと略す)マシンを採用したことにより、厚板中炭素鋼の铸造においては上部曲げゾーンで脆化温度域を高温側に回避するために、高速铸造による高温曲げが必要となった。

一方、下部矯正ゾーンは、大型円弧の採用によりメニスカスからの距離が長い上に、高剛性稠密ロールによる抜熱が大きいことから、脆化温度域を低温側に回避する強冷却铸造を採用した。この二次冷却条件の選択が、高速铸造においてもバルジング起因の内部割れを誘発することなく、健全な内部品質の確保を可能とした。

Table 1 Production system in Kakogawa Works

Grade	C. C. M.	Name	Slab size (mm)
Sheet	3CC	-	230 × 900 ~ 1800
	4-1CC	-	230 × 900 ~ 1800
	4-2CC	-	-
LL		LL	280 × 2100
S		S	230 × 1230
L		L	230 × 1770
Plate	LL	LL	280 × 2100

Table 2 Main specification of 4-2CC

Item	Specification
Type of caster	Vertical bending slab caster
Capacity	100,000 t/month
Number of strands	1
Machine length	40.5 m
Vertical length	2.95 m
Bending radius	10.7 m
Secondary cooling	Mist cooling
Main devices for high speed casting	Slab surface temperature measuring device Molten steel temperature measuring device Break out foreseeing equipment

3. 厚板中炭素鋼の高速鋳造条件<sup>4)</sup>

V-Bマシンで初の強冷却鋳造による高速鋳造を実施した結果、当初の目標通り脆化温度域を回避した曲げ、および矯正により表面横小割れ（横ひび割れ）は完全に防止することができた。しかし Fig 1 に示すように、強冷却ゾーンを通過中に発生したと推定される鋳片断面水平割れが発生した。この割れは、従来の曲げ型の3CC（鋳造速度1.0m/分）では、ほぼ同等の強冷却条件にもかかわらず極めて軽微であったが、4-2CCでは著しく増加した。また、4-2CCにおいても、円弧部で緩冷却を行った場合には全く発生しないが冷却の強化とともに増加し、さらに Fig 2 に示すように鋳造速度のアップとともに増加する傾向がある。

高速鋳造において水平割れが増加したチャージで写真1に示すようにスラブ狭面側のオシレーションマークのイン側が先行する変形が顕著に確認されたこれは、曲げ型の3CCでは強冷却条件下では見られない現象であり、4-2CCの強冷却鋳造に限って確認された現象である。この現象は、スラブのイン・アウト両面の冷却強度が円弧部強冷却ゾーンでアンバランスを生じていたことと、イン・アウト両面の強冷却により矯正時に高温部の狭面中央付近に変形が集中することが原因と考えられ、水平割れを助長する鋳片の変形挙動の結果と推定した。そこで、アウト面の冷却強度を緩めた結果、図3に示すようにオシレーションマークの変形のない、スラブが得られた。現在、高速鋳造は図4に示す強冷却パターンで鋳造している。

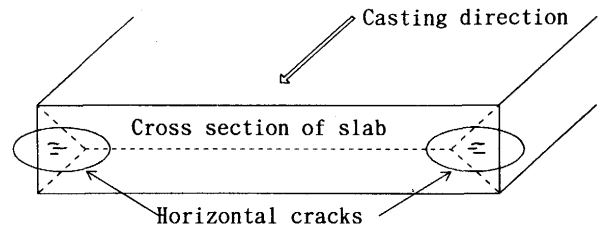


Fig.1 Schematic Diagram of horizontal cracks

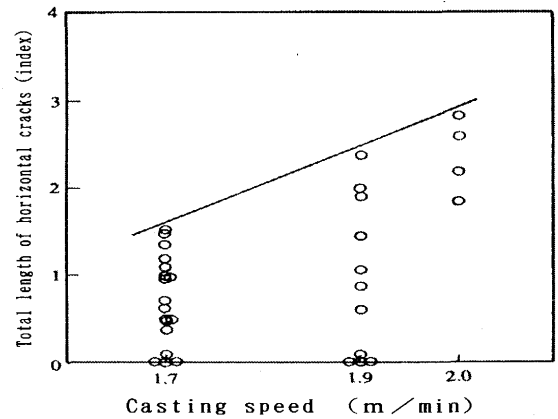


Fig.2 Relation between horizontal cracks in slab and casting speed

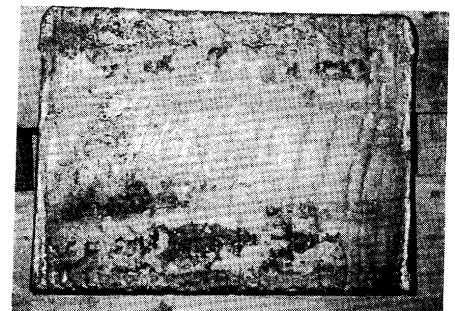


Photo.1 Distortion of oscillation marks on narrow face of slab under intensive cooling (L-size, Casting speed = 1.7 m/min)

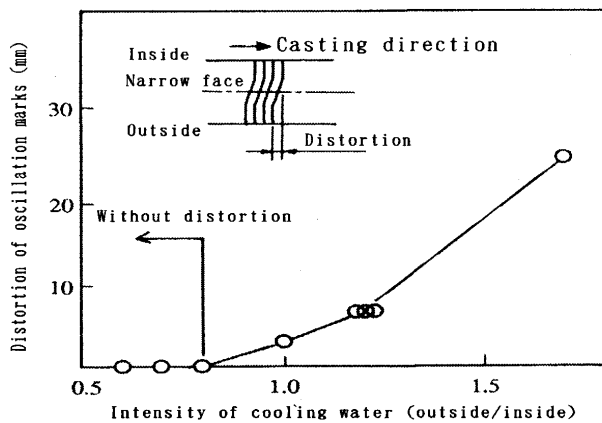


Fig.3 Relation between distortion of oscillation marks in narrow face and intensity of cooling water

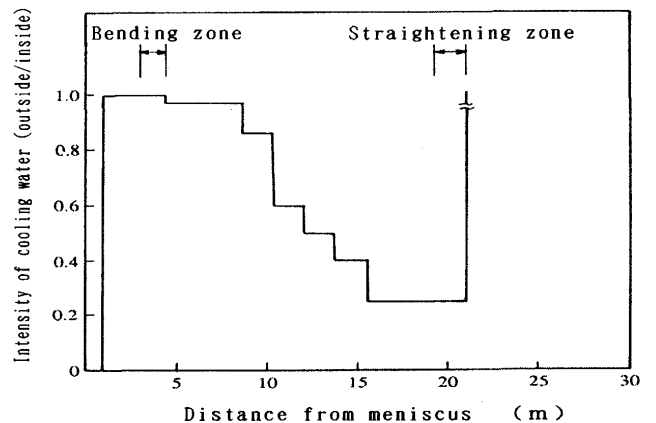


Fig.4 Example of cooling pattern at high speed casting

さらに、強冷却鋳造時に顕著に見られる駆動ロールのトルク分布のアンバランスを改善するために開発したトルクバランス制御を適用することにより、Fig 5に示すような全駆動ロールのトルク分布が均一化された状態での高速鋳造が可能となった。これらの条件を適用することにより、高速鋳造においても断面水平割れは著しく軽減され、また水平割れに起因する製品UT不良が大幅に減少した。

一方、今回4-2CCで中炭素鋼の高速鋳造に適用した垂直部緩冷却、円弧部強冷却の二次冷却条件は、中心偏析軽減にも効果があることが確認された。4-2CCでは中心偏析対策として水平ゾーンに高剛性稠密ロールスタンドを設置することにより、凝固末期のバルジングによる溶鋼流動を抑制している。さらに、強冷却鋳造による低温矯正後もFig 6に示すように水平ゾーンでイン・アウト両面の強冷却を継続する二次冷却条件を適用している。当冷却条件を適用することにより、Fig 7に示すように凝固末期バルジング量（計算値）が著しく軽減されることから、中心偏析を形成する凝固末期の溶鋼流動をさらに抑制する効果があると考えられる。この結果、Fig 8に示すように高速鋳造においてもスラブ幅方向の中心偏析度は低位安定している。

厚板中炭素鋼の2.0m/分の高速鋳造を可能にするには、最後に残された課題として中炭素鋼特有のコーナーかぎ割れの防止策を講じる必要がある。かぎ割れについては、一般に鋳型内での冷却の不均一による初期凝固シェル生成の不均一生成、および鋳型内における鋳片の引抜き抵抗等に原因があるといわれており、以下の各種対策を実施している。

- ①初期凝固シェルの均一化
  - (a)鋳型冷却水量の低減による鋳型内での緩冷却化
  - (b)鋳型内パウダーの高凝固温度化による緩冷却化
  - (c)鋳型内湯面レベルコントロール精度の向上
- ②鋳片引抜き抵抗の低減
  - (a)鋳型狭面テーパ量の適正化

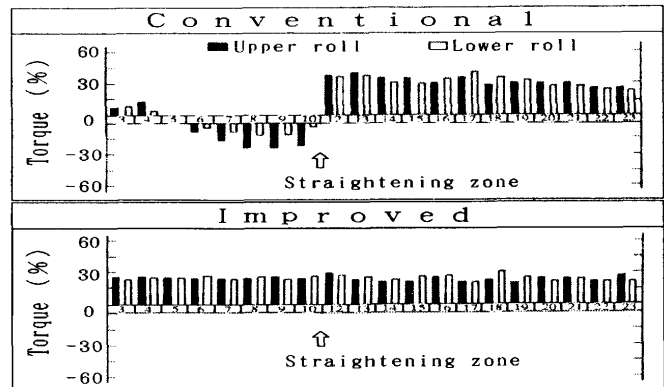


Fig.5 Torque distribution during casting under intensive cooling condition

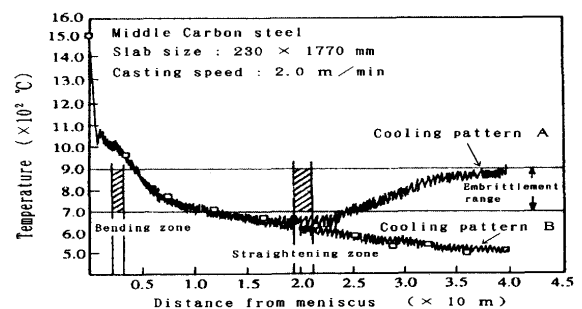


Fig.6 Slab surface temperature for improvement of center segregation (calculated)

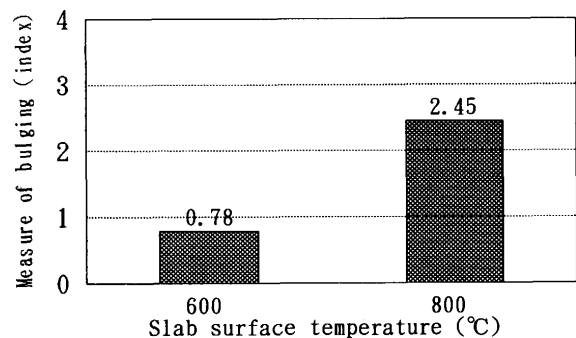


Fig.7 Relation between surface temperature and bulging in the last stage of solidification

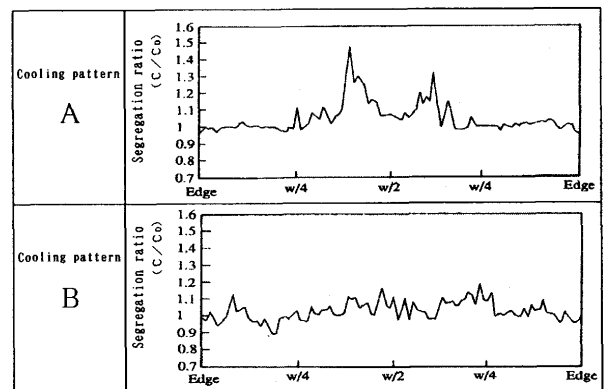


Fig.8 Effect of intensive cooling to the last stage of solidification on carbon segregation ratio

中炭素鋼の鑄型内パウダーについては、当初から Table 3 Characteristics of new mold powder for high speed casting 鑄型内の緩冷却化を図るため高塩基度タイプを適用しているが、今回さらに 2.0m/分においても十分な消費量を確保するために、Table 3 に示すように低粘性化を図った高速鑄造用パウダー B を開発した<sup>5)</sup>

鑄型冷却水量については鑄型内冷却の緩冷却化を目的に低水量化を図っているが、4-2CC ではさらに均一化を目的に、当所 4-1CC と同様に鑄型冷却水として純水を使用している。これにより鑄型内冷却水路(スリット)内壁への異物付着がなく、鑄型の履歴の影響を受けることなく常に均一な抜熱能が確保されるため、鑄型内の均一緩冷却の安定化に大きく寄与している。

さらに、鑄型狭面テーパ量については、Fig 9 に示すように鑄型内における凝固シミュレーション結果に基づき、鑄造速度に応じてブレイクアウトを発生させない範囲で接触圧力が最少となる狭面テーパ量を採用した。これらの各種対策により、高速鑄造時においてもかき割れの発生状況は従来の 1.7m/分なみに低位安定している。

以上の各種対策の実施により、4-2CC で S および L サイズの 2.0m/分を可能とするとともに、スラブ品質の向上により Fig10 に示すように、厚板スラブの HCR 実施率は 77% まで向上している<sup>6)</sup>。

#### 4. 結言

加古川製鉄所 4-2CC で、厚板中炭素鋼の 2.0m/分の高速鑄造を試行し、表面割れ、内部割れ、および介在物、中心偏析等の欠陥のない良好な鑄片が得られる鑄造条件を確認した。今後、S、L サイズで得られた知見をもとに、最大幅の LL サイズについても鑄造速度アップを試行していく計画である。

#### 参考文献

- 1) ㈱神戸製鋼所(私信) 1992年3月
- 2) ㈱神戸製鋼所(私信) 1992年9月
- 3) 星川ら CAMP-ISIJ Vol.5 (1992)-229
- 4) ㈱神戸製鋼所(私信) 1993年3月
- 5) 松田ら CAMP-ISIJ Vol.6 (1993)-259
- 6) 沖田ら 1993 AIME 76th Steelmaking Conf.

Characteristics	Powder A	Powder B
Optimum casting speed	1.7 m/min	2.0 m/min
Solidification Temperature	1170 °C	1155 °C
Viscosity at 1300 °C	0.6 poise	0.4 poise
CaO/SiO <sub>2</sub>	1.34	1.40

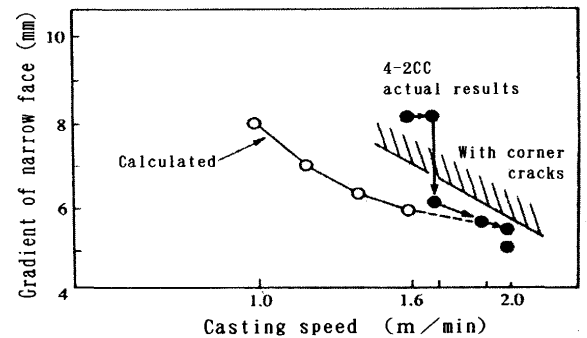


Fig.9 Adequate narrow side gradient for middle carbon steel

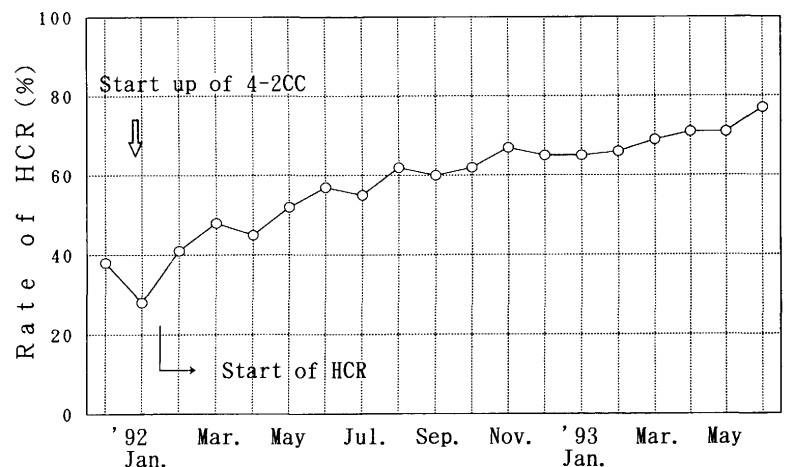


Fig.10 Transition of rate of HCR slabs for plates