

討 6

直結化を支える冶金現象

日本鋼管(株)中央研究所 工博 川上公成

1. 緒 言

連鑄-熱間圧延の直結化は無欠陥鑄片、鑄型内初期凝固・潤滑現象、パウダー、鑄片中変更、高速鑄造、ミスト冷却などの項目についての研究・開発とエッジ・ヒーター、鑄片搬送などの連鑄-圧延の直結化技術の研究・開発によって創出された技術であり、直結化による鑄片の熱片送入・圧延によりマイクロ・アロイング、材質制御による圧延材の材質特性向上、品質安定化に対する期待効果が大きく、さらに省資源・省エネルギーに大きく寄与している。

ここでは、連鑄-熱間圧延を支える冶金現象に着目して、鑄型内の溶鋼流動、鑄片初期凝固現象、潤滑現象にかかわる研究・開発と、直結化により期待されるマイクロ・アロイングや材質制御などの効果について、とりまとめて最近の状況と今後の課題についてのべる。

2. 連鑄-熱間圧延直結化技術

新日鉄堺¹⁾は熱延材の連鑄-熱延直結化プロセスの設備・操業条件を開発して無欠陥鑄片製造に見通しを得た。またバッファがまったくないCC-DR物流工程の管理システムを開発し、さらにRH-CC-D Rプロセスの操業の安定、品質、生産性の向上に必要な一貫した統括的なCCプロコン自動制御システムを開発した。

新日鉄大分⁵⁾⁷⁾は転炉-RH-連鑄を1:1:1に対応させたパターン操業技術と多連鑄技術を開発した。また無欠陥鑄片製造のため気水噴霧冷却法と圧縮鑄造(CPC)の開発をおこした⁶⁾。さらに直結プロセスの物流をリアルタイムにかつ高効率に計画、実行管理する生産管理システムを開発した⁷⁾。

鋼管福山は連鑄機と熱延の連続化をめざし、第二熱延工場に直結して5号連鑄機を新設し、昭和59年5月稼動した⁸⁾。5号連鑄機は高速鑄造速度(常時2.0m/min以上)を定常化している。このような高速鑄造をささえる技術としてはLiCO₂入り高速鑄造用パウダー⁹⁾、強冷却モールド、非サイン型鑄型振動¹⁰⁾、モールド直下支持、高速鑄造中幅替えなどの開発をおこなった。

川鉄水島¹¹⁾は新鋼片工場への連続化・同期化操業に対応すべく、水島第一連鑄機を2タンディッシュ8ストランドから1タンディッシュ6ストランドに昭和58年2月に改造した。鑄片品質向上対策としては、非金属介在物の浮上分離促進のため大型タンディッシュを採用した。鑄片表面割れ対策としてはモールド直下の冷却方式に気水噴霧ノズルを採用し、オシレーション機構をショート・バー方式とした。

住金鹿島¹²⁾はNo.3CC-分塊-圧延ミルを1ライン上に配列させている。この設備は昭和58年6月に稼動し大型タンディッシュ、ショートストロークハイサイクルオシレーション、ミストノズル、小ロールピッチ装置を採用している。

神鋼加古川においても連鑄スラブの表面改善技術への多大の努力が続けられている。

3. 連鑄鑄型内の初期凝固現象

スラブ連鑄の鑄型内初期凝固現象は無欠陥鑄片を製造するためのキーポイントとなる冶金現象の一つである。スラブ連鑄の鑄型内での現象の特徴を図式化してFig. 1に示す¹³⁾。溶鋼は浸漬ノズルから水冷鋼鑄型内のメニスカス溶鋼中に流出する。この際溶鋼流動の制御が課題となり、溶鋼流の短辺側反転流による溶鋼メニスカスの波立ち変動の鎮静化やノズル左右での溶鋼偏流の平均化が挙げられ

る。 モールドにおいて電磁ブレーキを用いてモールド内の溶鋼流を制御する技術の開発がなされている¹⁴⁾。

モールド・パウダーは一般には約30mmの厚みであるが、その溶融と流れ込みの概念図をFig. 1 にしめす。 溶鋼メニスカス上では数mm厚みの溶融スラグ層がありその上部に半溶融層・焼結層、パウダー層となっている。 凝固シェル先端はモールドオシレーションのネガティブストリップ中に圧縮されて内側に湾曲して半円状のメニスカスを形成し、このメニスカスに沿って溶融スラグがモールド流動にともなつてスラグ・スリット(slit of molten slag)を通過して水冷モールド表面と凝固シェル間に流入する¹⁵⁾。

溶融スラグは水冷モールド表面に

接した場合は1mm以下厚みの凝固スラグとなり、その内側の約100μmの溶融スラグ・フィルム(molten slag film)が鑄型-鑄片間の液体潤滑層となる。 パウダー特性をプール特性と流入・溶融フィルム特性にわけて解析が行なわれ、パウダーのAl₂O₃吸収能の向上が検討された¹⁶⁾。 パウダー物性に関しては、スラグのカスピダインやネフェリンなどの結晶化率が高いほどブレイクアウトの発生率が高い¹⁵⁾。

鑄型/鑄片間の摩擦に関してはスラグフィルム層内のせん断力(液体摩擦力)と鑄型/鑄片間の動摩擦(固体摩擦力)に分離し、拘束型ブレイクアウトはメニスカス近傍の液体摩擦力の増化によるものであることが示された¹⁷⁾。

鑄型内の初期凝固シェルの欠陥防止にはシェルの均一成長が必要であり、まずオシレーションサイクルについてショートストロークハイサイクル法¹⁸⁾や非サイン振動方式の実機化¹⁹⁾が開発されて割れや拘束性ブレイクアウトを伴わない振動方式や鑄造方式の開発が行なわれている。 さらにLiCO₂入りパウダーの併用により、鑄造速度2.0m/min以上でもモールドパウダの均一流入性に優れモールド内伝熱抜熱が均一かつ良好で、コーナー部のエアギャップが少なく、モールド直下で均一シェル厚みの鑄片をえることにより表面欠陥を低減することができた²⁰⁾。

今後については、鑄片に生じた割れ欠陥の解析も必要ながら、モールド直下で均一シェルをえるための条件について一層の追及と解析が望まれよう。

4. 二次冷却帯の緩徐冷方式

鋼の高温時での脆化挙動をグリーン試

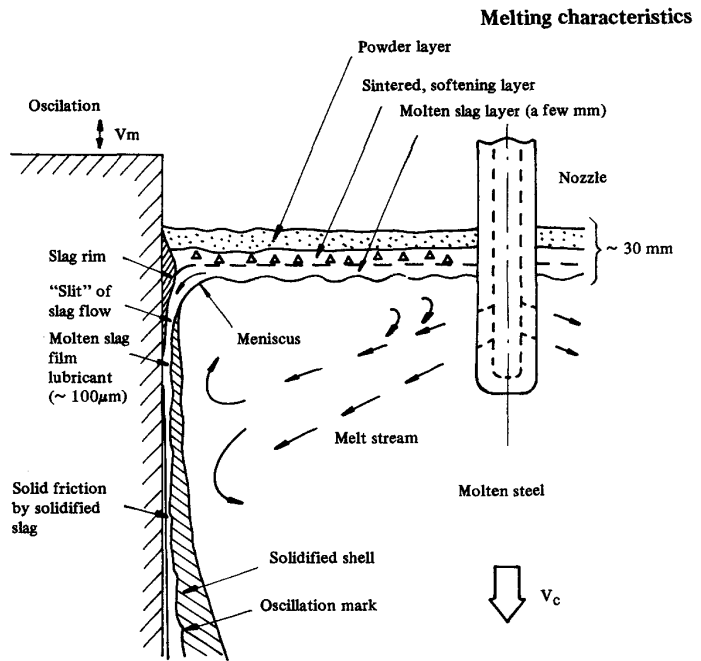


Fig. 1 Schematic diagram of mold lubrication of slab casting¹³⁾

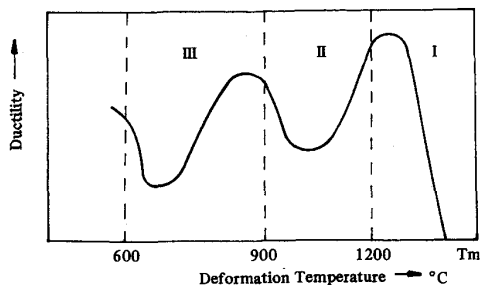


Fig. 2 Schematic presentation of ductility troughs appearing in hot tensile test.²¹⁾

実験を用いて調査した結果、鋼は高温域に Fig. 2 にしめすごとく I、II および III の脆化温度域を有することが明らかとなった²¹⁾。炭素鋼では融点から 600℃までの温度区間で脆化温度域 I は固相線温度近傍での dendrite arm 間の濃化液膜脆化であり、脆化領域 II および III はオーステナイト粒界での MnS などの析出物による脆化である。

二次冷却帯において脆化領域 II をさけるため緩冷却法の採用がおこなわれている。

具体的な緩冷却方法としては、均一緩冷却を可能にするためアトマイズ空気に水または水蒸気を添加した気水噴霧冷却 (mist cooling) がもちいられている^{5)~7) 11), 12)}。

Fig. 3 はこのような鋼の高温脆化領域に鑄造後の二次冷却条件による経過時間と温度変化の関係を示したものである²²⁾。図によればモールドに鑄造された溶鋼は凝固する際にメニスカス近傍で領域 I を通過する。その際、 δ - γ 変態にともなう不均一凝固により縦割れの核が発生する。これは包晶反応 A_0 変態にともなう鋼の場合には特に著しい。パターン A では、モールド直下からスプレーによる強冷却をうけて脆化領域 II に入り、矯正点近傍では、さらに領域 II に入っている。したがって縦割れの拡大は著しく促進されて割れ先端は γ 粒界割れの様相を呈する。一方、パターン B においては、モールド直下では領域 II を脱しており有利である。しかしその後のスプレー冷却による温度フラクチュエーションのためや、局部的に領域 II に入ってしまう縦割れの改善は可能であるが不完全である。パターン C はパターン B と同様にモールド直下では領域 II も回避しておりしかも温度フラクチュエーションが小さいために縦割れの拡大防止には有利なパターンである。このような冷却条件で鑄造された鑄片は、割れは dendrite arm 間でとどまっている。気水噴霧冷却法はパターン C を実機において実現する可能性に富んだ二次冷却法といえよう。

5. マイクロアロイング

熱片直送圧延をマイクロアロイングから見れば Fig. 4 に示すように²³⁾、こ

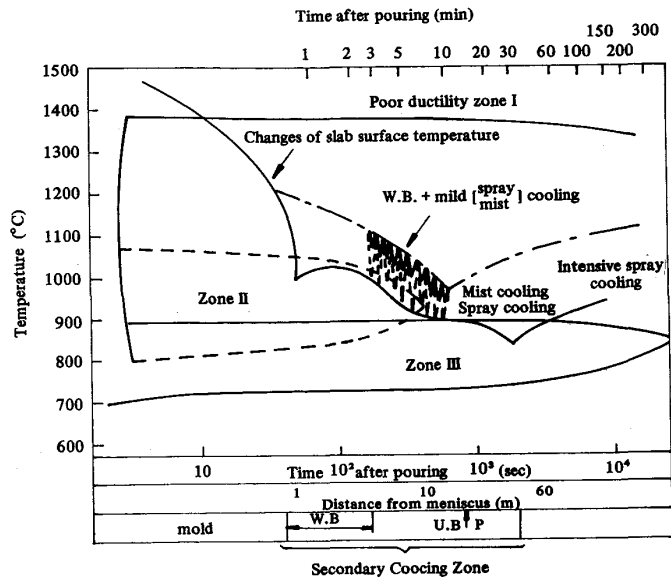


Fig. 3 Schematic diagram of poor ductility zone of steel and slab temperature change, showing the effect of mist cooling.²²⁾

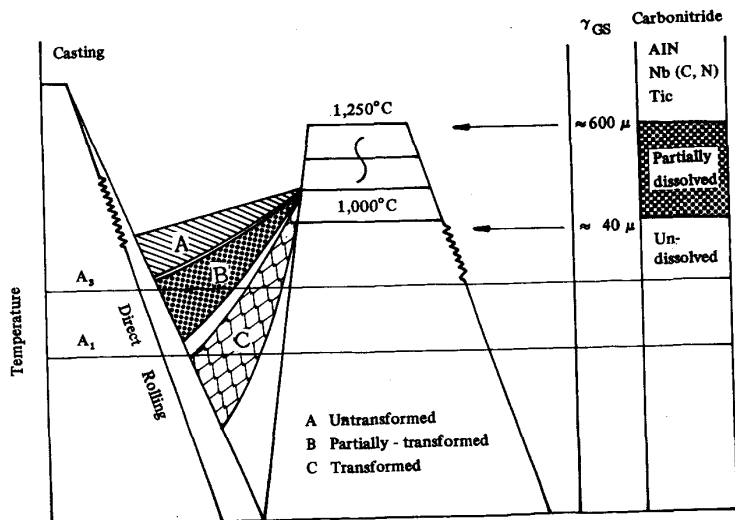


Fig. 4 Metallographic changes induced by reheating patterns during hot charge rolling or hot direct rolling.²³⁾

れまで凝固—スラブ加熱過程で繰り返された α - γ 変態を完全にあるいは不完全にしか経過しないことが大きな特徴となる。通常鋼では凝固ままの粗大 γ 粒が初期粒として存在するほか析出物の固溶、析出過程に大きな違いがでることが考えられる。このため熱片直送圧延材を材質的にも特徴づけるため、たとえば γ 域直送圧延を実現するためにはNbなどの添加剤のほか結晶組織の微細化あるいは再結晶細粒化を可能とする再結晶制御圧延法との組み合わせなどの新しい技術分野の開拓が必要となる²³。

マイクロロイニング技術は今後日本の鉄鋼の高品質化、高附価値化の上からますます重要になってくることと考えられる。合金元素Nb、V、Tiなどは凝固のさい介在物、炭窒化物の析出、未固溶析出物、歪誘起析出物、変態中の析出物、固溶の四つの存在形態となる。これらの介在物、析出物は熱片製造時の表面欠陥の原因となり、このような鋼の製造においては前記の無欠陥製造対策に加えて、さらに溶鋼の高純度化を徹底してC、N、P、Sなどの不純物元素を低減しておく必要がある。

6. 結 言

連鑄—熱延の直結化技術は鉄鋼の品質の安定・向上と鉄鋼プロセスの省資源・省エネルギーの上から今後ますます普及してゆくことになろう。その際無欠陥熱片の製造が前提条件となるが、ここでは無欠陥熱片を製造することにかかわる冶金現象についてこれまでの努力と今後の課題を述べた。

7. 文 献

- 1) 蜂谷、中島、山口：鉄と鋼、68(1982)、S. 209
- 2) 磯、大田、田中、武田、岡島、田中：Ibid. S. 210
- 3) 中村、林、末松、権野、甲斐、清田：Ibid. S. 211
- 4) 磯、椿原、久々、藤井、細川、梶田：Ibid. S. 212
- 5) 原田、稲葉、仲、小宮、尾花、小寺：鉄と鋼、68(1982)、S. 213
- 6) 桑原、山内、岡田、益守、高浜、常岡：Ibid. S. 214
- 7) 藤沢、渡辺、吉村、中島、富田、岩尾：Ibid. S. 215
- 8) たとえば 小谷野、寺田、内田、和田、田口、小島：鉄と鋼、71(1985)、S. 156
- 9) 宮脇、半明、内田、寺岡、白谷、石田：鉄と鋼、71(1985)、S. 144
- 10) たとえば 水上、川上、宮原、鈴木、北川、寺田：鉄と鋼、71(1985)、S. 247
- 11) 得丸、中西、児玉、山咲、大杉：私信
- 12) 前原、安元、大森、友野：私信
- 13) 川上：冶金物質の高温物性第140委員会、昭和59年12月13日「鋼の連鑄用パウダーの物性と熱片性状シンポジウム」
- 14) 鈴木、村田、中西、新良、児玉、小島、宮崎：鉄と鋼、69(1983)、S. 912
- 15) 中戸、野崎、垣生：文献13と同じ。
- 16) 中野：文献13と同じ
- 17) 水上、北川、川上：鉄と鋼、70(1984)、S. 151
- 18) 住友金属 鹿島：製鋼部会 鋼-81-自
- 19) 鈴木、北川、内田、政岡、小沢、森：鉄と鋼、71(1985)、S. 1026
- 20) 小谷野、政岡、和田、森、北川、鈴木：鉄と鋼、71(1985)、S. 1022
- 21) 鈴木、西村、山口：鉄と鋼、65(1979)、P. 2038
- 22) 河野、島、桑原、山本、和氣、常岡：鉄と鋼、68(1982)、P. 1792
- 23) 高坂、三瓶、大内：未発表