

Development of Continuous Casting Technologies at Kawasaki Steel



反町 健一
Kenichi Sorimachi
技術研究所 鉄鋼プロセス研究部 水島鉄鋼研究室長(部長)・工博



蓮沼 純一
Junichi Hasunuma
水島製鉄所 製鋼部 製鋼技術室長(課長)

要旨

この10年間の川崎製鉄における連続鑄造技術の進歩を操業と品質の両面から概括した。生産性向上技術としては、タンディッシュ熱間再使用などの超多連鑄技術と鑄込準備の短縮を図り、稼働率は安定して92%を超えた。また、電磁モールド(FC Mold)などの高品質鑄造技術の確立により、最大2.5 m/minの高速鑄造を可能とした。熱延ミルとの同期化操業を図り、加熱炉装入温度は850℃以上を達成した。高品質鑄造技術としては、FC Moldや連続鍛圧などの、表面から内面まで全断面にわたる高品質化要素技術を開発した。その結果、DI罐のフランジ割れ欠陥や冷延コイルの製鋼起因欠陥率は、大幅な低減が実現した。

Synopsis:

The development of continuous casting technologies at Kawasaki Steel during the current decade is described from the viewpoint of operation and product quality. The operating ratio exceeded 92% by the introduction of tundish hot recycling technology and so on. Electromagnetic flow control mold (FC Mold) enabled an improvement in slab quality and an increase in casting speed up to 2.5 m/min. Synchronized operation with the hot rolling process made it possible to charge slabs into the reheating furnace over 850℃. FC Mold and continuous forging process were developed as the advanced methods for the initial and final stages of solidification. As a result of the technical advancement, the quality of DI-can and cold rolled coil have been improved significantly.

1 緒言

1985年に日本の連鑄比率は91.4%に達した。1973年と1979年の2度にわたるオイルショックを経て、省エネルギー、省プロセスとしての連続鑄造の有利性が再確認されて製鋼プロセスの中での位置づけが確立された。

また、1985年は円高ショックの年であり、現在に至る鉄鋼をとりまく環境の変化が、初めてその姿をあらわしたエポックメイキングの年であった。第2次オイルショックで大きく落ち込んだ米国の自動車産業も、1985年には従来のレベルに回復している。したがって1985年以降は為替レートをキーとする国際競争力が問われ続けた時代と考えられる。

このような状況下で連続鑄造プロセスに求められた課題は、(1) 高能率生産 (2) 高品質鑄片製造 (3) 次工程との更なる直結化に集約される。本報告は、この10年間の連続鑄造技術の進歩を操業と品質の両面から概括した。

2 生産性向上技術

2.1 稼働率の向上技術

連鑄生産能力の向上を目的として、鑄込み速度の高速化や非稼働

時間の短縮と稼働率(鑄造時間率)の向上のための様々な技術が開発されてきた。水島製鉄所第5連鑄では、1978年に鑄型内に冷却材を挿入して、凝固隔壁を作る異鋼種連々技術を工程化し、1979年には鑄込み中自動幅変更技術を工程化したことにより、ダミーバー当たりの連々ヒート数が約25ヒートに増加し、180 000 t/月の生産量を達成したり。その後1984年には鑄片品質の改善と生産性向上を目的として、タンディッシュ容量を45 tから60 tに大容量化し、第一世代電磁ブレーキ Electro Magnetic Brake (EMBR) を設備化した²⁾が、極低炭素鋼に代表される表面品質、内部品質厳格材の鑄造量が増加し、鑄込み速度の高速化による大幅な生産性向上は困難であった。そこで超多連鑄による鑄造時間率の向上をはかり、1991年には927連の超多連鑄を達成し、1ダミーバー装入当たりの連続鑄造量は、247 000 tを記録した。

超多連を可能にした主な技術は、鑄型寿命の延長、高速幅拡大による幅変更量の制約緩和および小ロットオーダーに対応したタンディッシュ熱間再使用技術などである³⁾。

(1) 鑄型寿命延長技術

鑄型寿命を決定する要因の大半は銅板温度上昇に起因しており、安定した十分な冷却を得るため、冷却溝の形状とピッチを変更した。さらに銅板下部の摩耗対策として、耐摩耗性に優れたNi-Fe(Fe: 8~10%)を実用化し、あわせてめっき範囲と厚みについても改善を加え1989年には1 000ヒートの連続使用が可能となった。

さらに1994年にはサブクール沸騰領域での冷却と銅板の薄肉化を併用することで強制対流冷却に比べ銅板表面のメニスカ

* 平成8年3月11日原稿受付

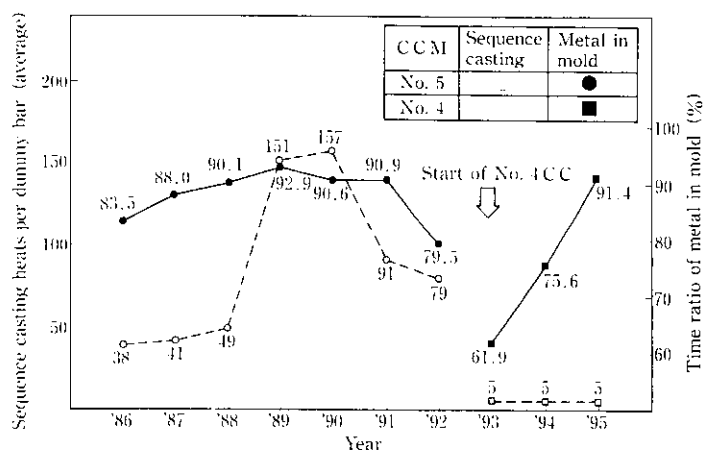


Fig. 1 Change of sequence casting and time ratio of metal in mold in No. 5 C C M and No. 4 C C M at Mizushima Works

ス温度で100℃程度の強冷化が可能となり⁴⁾、水島第4連鋳では、モールドオンライン寿命は3000ヒートを超えるに至っている。

(2) モールド高速幅拡大技術

連々鋳造の自由度を拡大するため、熱延での幅プレスと合わせて、高速幅拡大を工程化し、幅変更量の制約をなくした。短辺移動速度については、バルジング歪を考慮した独自のパターンを開発した。この結果、幅変更のための連々鋳の中断は解消された。

(3) タンディッシュ熱間再使用技術

小ロットオーダーの操業では、次タンディッシュの予熱が間に合わない場合が発生するが、これに対してタンディッシュ内の残鋼を排出して短時間のうちに熱間再使用する技術を開発し工程化した。この結果、タンディッシュの予熱待ちによる連々鋳の中断が防止できた。

Fig. 1に水島第5連鋳のダミーバー当たりの連々数と鋳造時間率推移を示すが、ダミーバー連々数は1989年以降飛躍的に増加し、歴時間稼働率も安定して90%を維持することができるようになった。しかし熱間圧延との高同期化操業を前提とした場合、稼働率向上を目的とした異鋼種連々法は、継ぎ目鋳片の成分チェックや機内停止鋳片の温度低下が生じ、DHCRプロセスでは弊害となる。そこで、1993年に稼働した第4連鋳ではダミーバー上方挿入方式を採用し、鋳込み準備時間を下方挿入方式の50 minから12 minに短縮し、ダミーバー当たりの連々数が平均5ヒートでも鋳造時間率を90%以上にするのを可能にした。また、70 t大容量タンディッシュ、垂直モールド、第二世代電磁ブレーキ (FCモールド)、小径分割ロールの採用などにより、最大2.5 m/minの高速鋳造を可能にし、1995年5月に月間生産量は277 000 tを記録した。

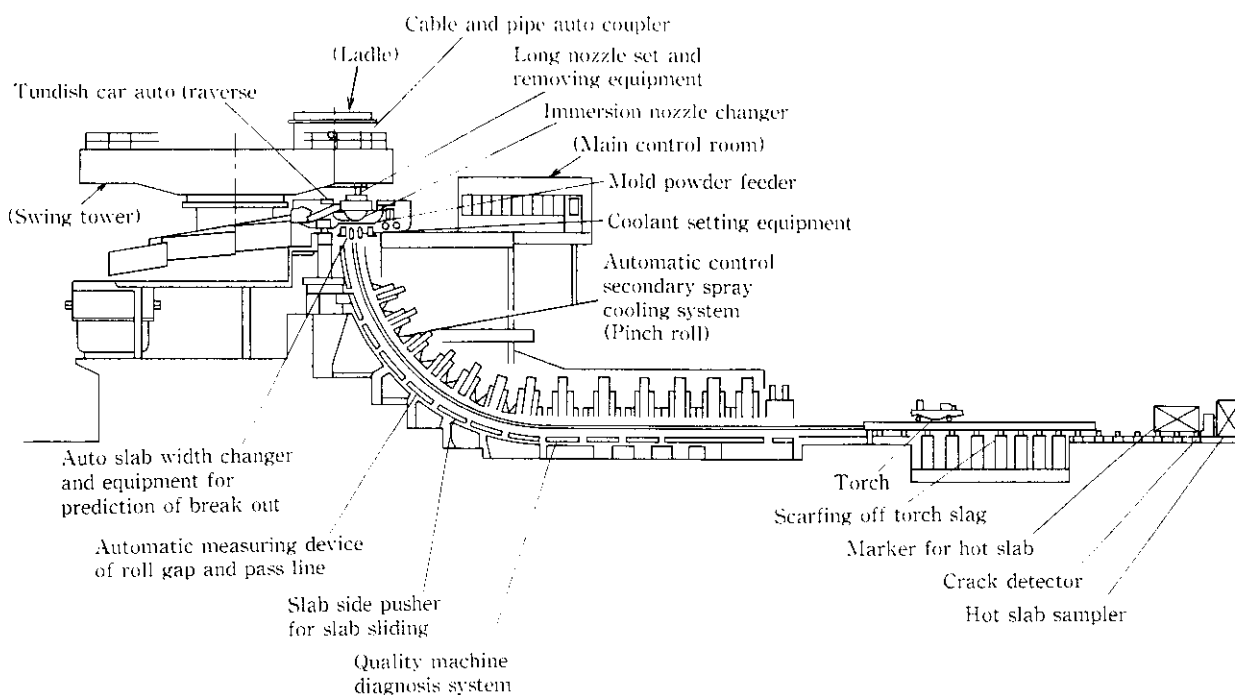


Fig. 2 Schematic diagram of automated equipment in continuous casting process

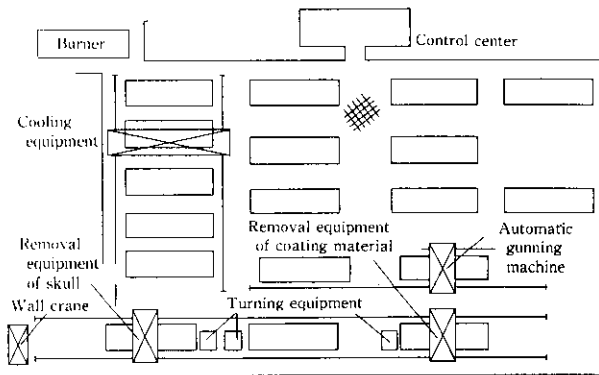


Fig. 3 Layout of the tundish service yard

2.2 自動化省力化技術

連鋳操業の自動化は、まずモールド幅変更、注入量や鋳込み速度制御、冷却水制御などの主要作業から進められ、続いて高熱環境で熟練を要する作業の自動化が着手された。1987年には取鍋の配線配管着脱、浸漬ノズル交換、異鋼種連々時の連結金物投入および熱間スラブからのサンプル採取などの諸作業を自動化した⁵⁾。Fig. 2にその概要を示す。

さらに1988年には、最も多くの要員を必要とするタンディッシュ交換作業を自動化し、タンディッシュ移動、浸漬ノズル取り付け、異鋼種連々隔壁金物投入などの一連のタンディッシュ交換作業を一人で集中制御することを可能にした⁶⁾。

またタンディッシュ整備作業も Fig. 3に示すように、れんが解体機、自動吹き付け機などを導入し、集塵設備の強化により作業環境を改善し、整備作業時間を約60%に短縮した⁷⁾。

水島第4連鋳ではこれらの自動化技術に加え、連鋳操業監視、オペレーションの集中化および情報の一元化を目的として、初めてEIC統合システムを採用した⁸⁾。その結果、電気、計装、計算機の情報をも同一画面で見ることができ、また機電一体設備の状況監視および操作も可能で、オペレーターの省力に寄与している。さらに搬出ラインも完全無人化し、トーチ切断からスラブが熱片無人搬送台車に積載されるまで鋳込み床で集中監視できるようにした。タンディッシュ整備作業については、熱間連続使用するため鋳込み床にス

ライディングノズル自動交換装置を設置しオペレーターが操作する。したがってオフラインでのタンディッシュ整備作業は月間2～3本程度しか発生せず、タンディッシュ整備要員は大幅に低減した。

2.3 連鋳一圧延間の連続化・同期化操業技術

当社水島製鉄所では1983年に第1連鋳、第3連鋳と鋼片工場を熱片無人搬送台車で結びブルーームのDHCRを開始し、DHCR率92.1%を達成した⁹⁾。スラブ連鋳では、設備制約からHCRに留まっていたが、1993年に第4連鋳機を建設し、熱延工場と熱片無人搬送台車(Dライナー)で結ぶことにより、DHCRを開始した。

DHCR操業を効果的にするためには、高温無欠陥鋼片の製造技術と品質保証技術が不可欠であり、高品質高速鋳造を可能とするため、Table 1に示す技術を導入した。

第4連鋳工場から加熱炉までの距離は670 mあり、搬送中の温度降下を極力抑制することが重要であり、高温・高頻度の使用条件に耐えるようDライナーの保温室構造を決定した¹⁰⁾。Fig. 4にDライナーの断面図を示すが、上扉耐火物に高温での可撓性と強度に優れた長繊維セラミックファイバー、結結装置に高温酸化と熱変形の少ない材料、床・側壁耐火物に低熱慣性材質を選定している。その結果、Dライナーで搬送中の温度降下量は10℃以下に抑制可能で、Fig. 5に示すように、加熱炉へは850℃以上の高温装入を達成している。

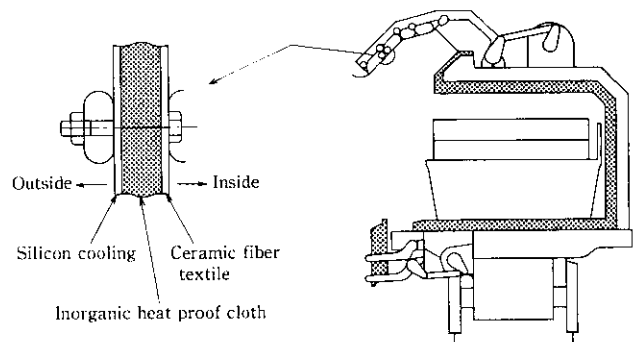


Fig. 4 Cross section of D-liner

Table 1 Key technologies for high productivity and high quality

Equipment	Technologies of No. 4 C C at Mizushima Works
Tundish	Large tundish without air contamination
Mold	Adoption of Flow Control Mold High accurate and reliable mold level control High frequency oscillation system with hydraulic drive
Roller apron	Vertical zone below mold (3 m) Mutipoints bending and unbending Adequate secondary cooling pattern with mist spray cooling system Short-pitch divided rolls for all the segments

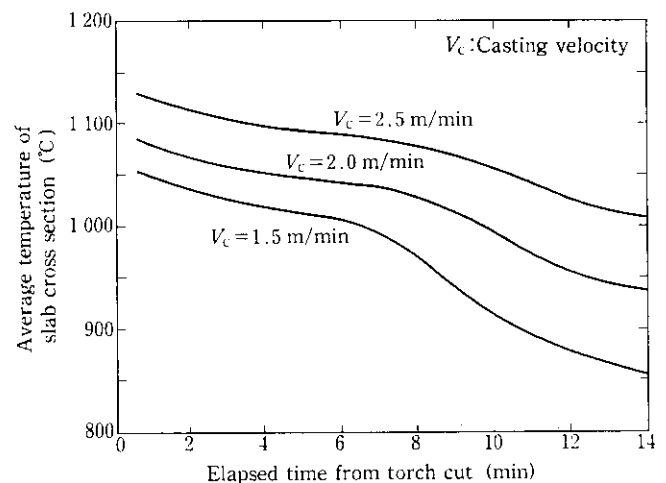


Fig. 5 Transition of slab temperature

3 高品質鑄片製造技術

川崎製鉄千葉製鉄所第3製鋼工場は転炉にQBOPを採用しており、精錬炉の特性として同一吹止C値で酸素レベルが低いことがあげられる。この特性を生かして薄板用鋼向けのVB型連続鑄造機（千葉3C）が設置稼動したのは1981年7月であった。

厚板用鋼、条鋼、ステンレス鋼、特殊鋼の分野では1985年段階では連鑄比率も飽和傾向にあり、この10年間は主として薄板用鋼の鑄造に精力が注がれた。同時期に表面処理鋼板の比率も急増しており、コイル表面欠陥に対する要求が厳格化した時代とも言える。

3.1 Advanced 初期凝固制御技術 —FC Mold—

薄板を中心にバッチ焼鈍からCALへの切換えが急速に進んだ。これを可能とした技術は、RH脱ガスによる脱炭処理技術の発展であった。製品での鋼中炭素量は20 ppm以下、時には10 ppmの要求に応えられるまでに進歩した。しかし、極低碳素鋼は低碳素鋼に比べ製品の表面欠陥が発生しやすいことが知られている。これは、モールド内での初期凝固形態が異なり^{11,12)}、オシレーションマーク部の爪が深く、この部分にガス気泡や非金属介在物が捕捉されやすいためである(Photo 1)。そのため、健全な鑄片を得る、より高度の初期凝固制御技術が必要となった。

Flow Control Mold (FC Mold) は、この要求に応えるものである。静磁場を鑄型に組み込んだ最初の形は2章で述べたようにEMBR¹³⁾であったが、FC Moldはこの機能を徹底的に追究した姿として完成された。鑄型長辺面の上下2段にわたって幅方向に一樣な切れ目のない形で磁場を配した構造となっている¹⁴⁾ (Fig. 6)。FC Moldを印加すると、鑄型内の溶鋼流動が変化して、メニスカス部の溶鋼温度が5～10℃上昇する¹⁵⁾。

また、メニスカス水平流速の平均値の減少と流速変動の著しい減少が観察される (Fig. 7)。これらによって、極低碳素鋼の2 m/min以上の高速鑄造時においても、モールドパウダーの削り込みや渦巻き込みが無くなり、モールドパウダー起因の製品欠陥率を著しく低減することが可能となった。また、下部磁場によりクレーター内への溶鋼侵入深さが減少することから、鑄片内の清浄度が向上する¹⁵⁾ (Fig. 8)。

自由表面であるメニスカス凝固方式を基本とする現行のスラブ連

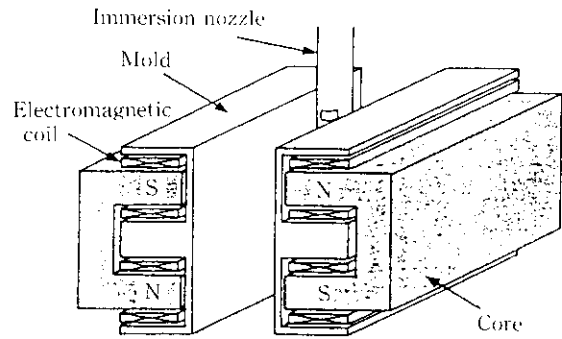


Fig. 6 Flow control mold (FC Mold)

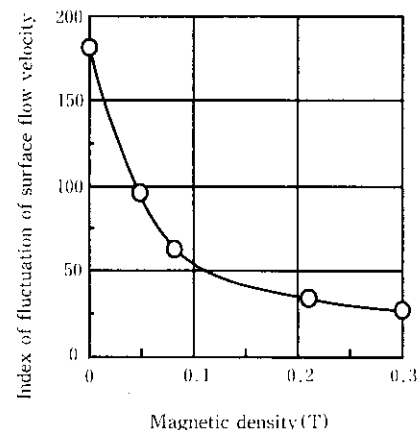
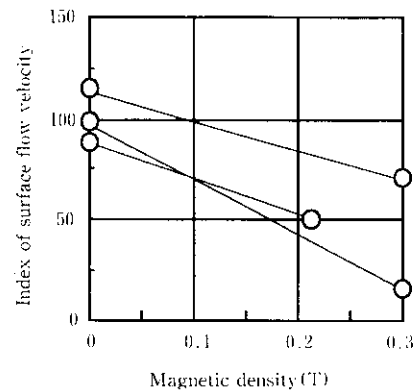


Fig. 7 Effect of magnetic density on surface flow velocity and its fluctuation of molten steel in the mold

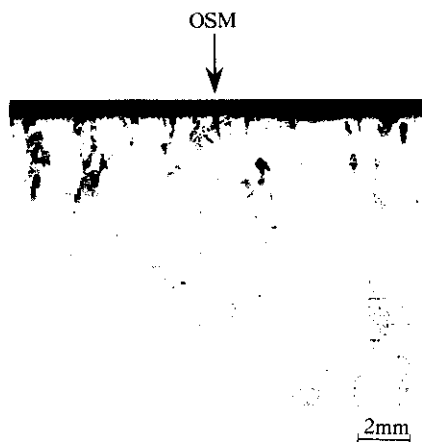


Photo 1 Blow hole trapped at inside of the oscillation mark (OSM) hook

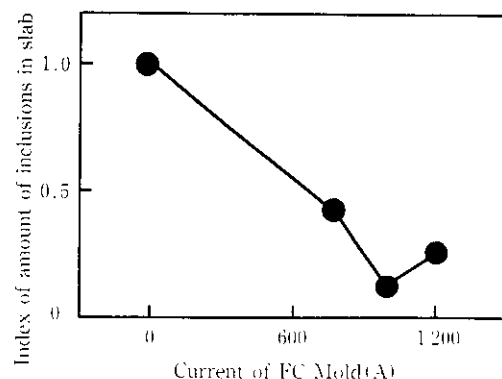


Fig. 8 Effect of FC Mold on cleanliness of slab

連続鑄造では、湯面近傍かつ鑄型面近傍の初期凝固挙動が、健全な製品表面を得るのに極めて重要であり、今後も大きな研究開発課題となろう。たとえば著者の一人の数値計算でも、メニスカス部の凝固はスーパーヒートの大小で、初期凝固シェルの先端部状態が大きく異なっており (Fig. 9), 更に溶鋼流動と凝固の問題もあわせて考えると FC Mold をひとつの突破口として次の開発が待たれる所である。

3.2 Advanced 末期凝固制御 —ブルーム連続鍛圧—

下注鋼塊の逆 V 偏析が造塊法の本質的欠陥であったのと同様に、連続鑄造法では中心偏析が構造的欠陥であり、その低減への努力が払われてきた。特にブルーム連続鑄の場合には最終凝固面積が小さいために、偏析成分が集中しやすい。さらに軸受鋼、ピアノ線材、タイヤコード用鋼等の高炭素鋼では、溶質量の絶対量が多いことに加えて、その加工工程で熱処理されることが多く、マルテンサイト組織の硬度変化が生じて製品欠陥を発生しやすいかった。

そこで、中心偏析の抜本的な解決手段としてブルーム連続鍛圧技術の開発が進められた。

連続鍛圧¹⁶⁾ (以後、連鍛) は、凝固末期相当部位において、上下 2 段の可動する金型によって鑄片に大圧下を連続的に加えるプロセスである (Fig. 10)。未凝固鑄片に大変形を加えるアイディアは、古くより提案されており、条鋼や線棒のインライン圧下プロセスとして研究されたことがある¹⁷⁾。しかし、未凝固状態では、凝固前面に限界歪以上の変形が加わると、内部割れを生ずるといった本質的な特性を有している。この限界歪は凝固シェル厚の逆関数であり、鑄込中連続幅変更のように比較的シェル厚の薄い鑄型内では大変形プロセスが実現しているが、凝固末期への適用は困難であった。連鍛はこの問題を回避するために、大型金型、鍛造という短時間大変形を利用する点に特徴がある。

連鍛では中心偏析の度合を自由に制御できる点が大きな特徴であり、製品の用途に応じて軸芯部の負偏析も可能である¹⁸⁾。PC 鋼線やタイヤコード線材では、中心部炭素濃度を 0.72% とすることにより製品特性の向上が得られている¹⁹⁾。また、本プロセスの解析によって従来は半定量的であった、高固相率下での液相の流動現象の定量的理解が進んだ²⁰⁾。

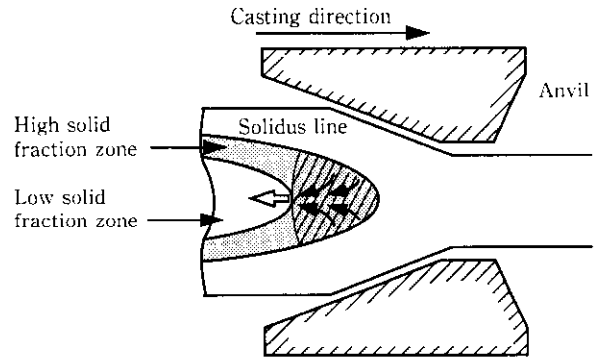


Fig. 10 Concept of continuous forging process

連鍛は、中心偏析の問題のみならず、5%Cr シームレス素材等の中心部サグの問題解決にも効果的であることが判明しており²¹⁾ (Fig. 11), 適用の範囲拡大が進んでいる。

3.3 製品の高品質化進展の事例

以上、主な高品質化技術について述べてきたが、その他にも多くの開発がなされた。転がスラグ、取鍋スラグの流出検知や取鍋内のスラグ改質、タンディッシュの完全密閉化なども高潔浄度鋼の溶製には不可欠な要素技術である。これらのさまざまな開発の総合的評

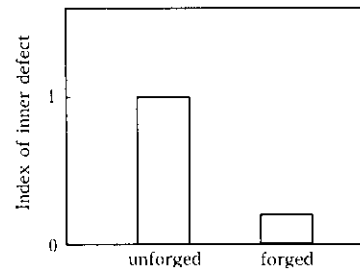


Fig. 11 Effect of continuous forged method on internal quality of 5% Cr seamless tube

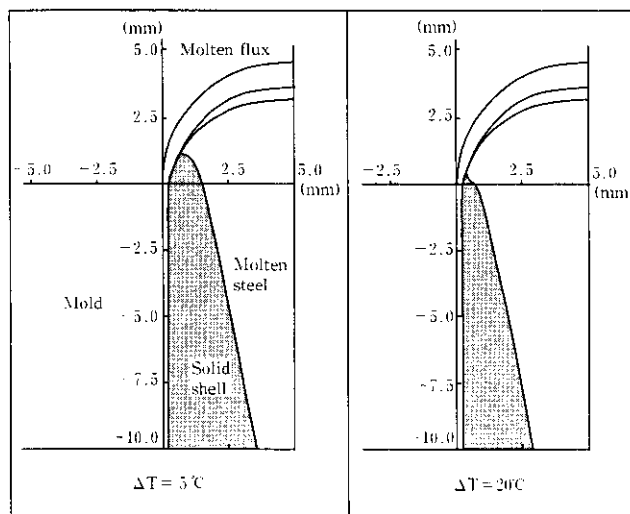


Fig. 9 Influence of super heat of steel on the initial solidification

価例として次に、DI 罐のフランジクラック欠陥率の推移を Fig. 12 に示した。50 μ 以下のクラスター状介在物も問題となる DI 罐においては、高纯净化のための対策があらゆる面で採用されている。これらの諸対策の結果、現在では不良を根絶することができるようになった。

また、薄板用鋼も、自動車用外板では高鮮映性鋼板（レーザーミラー鋼板）等の表面厳格材の要求が増大した。徹底的な再酸化現象の抑制をはじめとして、脱酸方法やモールドパウダーの改良を図ることにより、冷延鋼板での製鋼要因欠陥率は Fig. 13 に示すごとく順次低減し、この 7 年間で 1/7 に減少した。

4 結 言

この 10 年間、連続鋳造に求められた課題は、高生産性、高品質

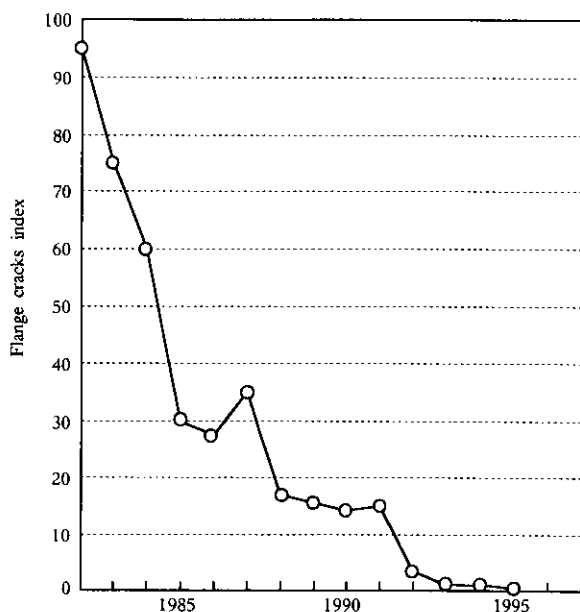


Fig. 12 Reduction of flange cracks index in DI can

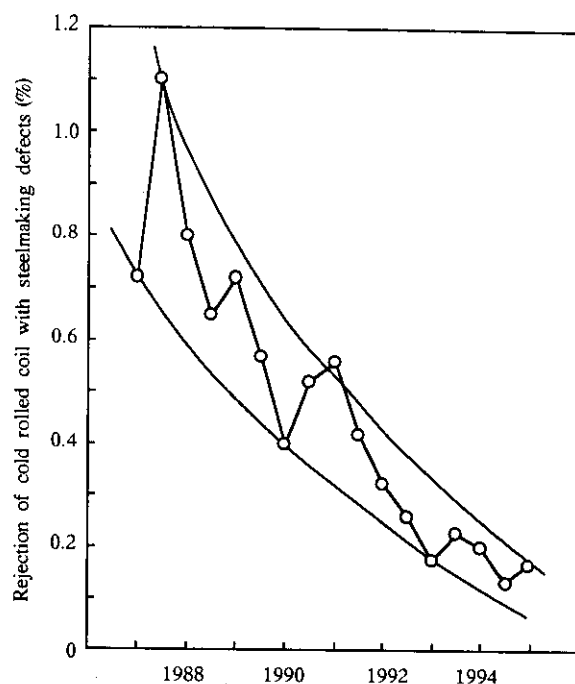


Fig. 13 Improvement of surface quality of cold rolled coil with steelmaking defects

鋳片製造と次工程との直結化に集約される。生産性向上技術としては、タンディッシュ熱間再使用を軸とした超多連鋳造技術により、稼働率は 92% を安定して達成した。電磁モールド (FC Mold) などの高品質化、高速鋳造技術により、最大 2.5 m/min の鋳造速度を可能とした。熱片無人搬送台車による DHCR により加熱が装入温度は 850°C 以上を達成した。FC Mold や連続鍛圧を核とする鋳片表層部から中心部までの全断面にわたる高品質化要素技術を開発した。その結果、例えば DI 罐のフランジ割れ欠陥や冷延コイルの製鋼起因欠陥率は大幅に低減した。

参 考 文 献

- 飯田義治, 大森 尚, 前田瑞夫, 小島信司, 越川隆雄: 川崎製鉄技報, 12(1980)3, 405
- 日和佐章一, 白石伸司, 平田賢二, 菅野明夫, 児玉正範, 岩永侑輔: 鉄と鋼, 71(1985)4, S 153
- 池田圭吾, 大西 廣, 後藤信孝, 数上文夫, 蓮沼純一, 日和佐章一: 材料とプロセス, 3(1990)1, 192
- 桑山彰崇, 松井功夫, 白石伸司, 後藤信孝, 大西 廣, 赤崎琢也: 材料とプロセス, 7(1994)4, 1183
- 田中秀幸, 白石伸司, 岩永侑輔, 日和佐章一, 下戸研一, 市原 晃: 川崎製鉄技報, 19(1987)1, 41
- 藤山寿郎, 上野清博, 浜西信之, 前田瑞夫, 岩永侑輔, 数上文夫: 材料とプロセス, 1(1988)1, 275
- 南部正夫, 小笠原一紀, 松生 昭, 白石伸司, 平田賢二, 今井卓夫: 鉄と鋼, 71(1985)4, S 155
- 刀根 功, 山根 明, 浦上雅彦, 斧田 大, 馬田 一, 三崎規生: 材料とプロセス, 6(1993)4, 1116
- 得丸豊久, 中西輝行, 児玉正範, 山崎順次郎, 大杉賢三: 鉄と鋼, 72(1986)10, A 211
- 岡本浩志, 松川敏胤, 菊川裕幸, 小西敏宏, 内田秀史, 頭山 奨: 材料とプロセス, 6(1993)5, 1428
- 梶谷敏之, 江阪久雄, 若生昌光, 三隅秀幸, 萩林成章: 鉄と鋼, 81(1995)11, 1055
- 安中弘行, 山中量一, 井上 健, 斎藤 忠: 鉄と鋼, 81(1995)5, 529
- J. Nagai, K. Suzuki, S. Kojima and S. Kollberg: Iron and Steel Engineer, May 1984, 41
- 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 杉沢元達, 森脇三郎: 材料とプロセス, 5(1992)4, 995
- 反町健一: 第 153 回, 154 回 西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1994), 105
- 小島信司, 今井卓雄, 藤村俊生, 溝田久和, 松川敏胤: 鉄と鋼, 78(1992)12, 1794
- 竹原鋭郎, 山崎大蔵, 角井 洵, 林 寛治, 秋田秀喜: 鉄と鋼, 60(1974)7, 875
- 藤村俊生, 櫛田宏一, 本郷 晴: 川崎製鉄技報, 28(1996)1, 39
- 藤田利夫, 松崎明博, 川縁正信: 川崎製鉄技報, 26(1994)1, 19
- 鍋島誠司, 中戸 参, 藤井徹也, 櫛田宏一, 溝田久和, 藤田利夫: 鉄と鋼, 79(1993)4, 479
- 大島健二, 奥田治志, 植島好紀, 和田芳信, 鍋島誠司, 増田敏一: 材料とプロセス, 5(1992)1, 325