



鋼の連続铸造法—今日，明日—

郡 司 好 喜*

Continuous Casting of Steel —Today, Tomorrow—

Kōki GUNJI

1. はじめに

金属の凝固プロセスは相変態であり、熱移動と物質移動が相互に関連する複雑な過程であるが、造塊法によって鋼塊を得る工程ではこうした複雑な過程も平均化され、その仕組みが分からないまま過ぎてきた。連続铸造法（以後連铸法）の開発により、そうした複雑な仕組みが次第に明らかにされて新しい知識として蓄積され、大きな技術革新の足がかりになったとも言える。

このように鋼の連铸法は開発の歴史が浅いにもかかわらず目覚ましい発展を遂げ、完成度の高い技術になりつつある。以下にこの技術の現状とこれからの展望などを述べる。

2. 鋼の連铸化は進んでいる

1950年 Mannesmann 社と Junghans が鋼の連铸機の第1号機を造つてから30有余年、日本の鉄鋼業のさきがけとして技術の発展が計られてきた。図1¹⁾に示すように、わが国の連铸比率はすでに89%（昭和59年）を超え、連铸で造れない鋼種はきわめて限られたものになっている。図1から分かることは、ヨーロッパ諸国の連铸比率が急速に伸びてわが国を急追している反面、アメリカ、ソ連といった工業先進国の連铸比率が依然伸び悩んでいることである。ソ連の特殊事情を除けば、ア

リカの低比率は鉄鋼業の衰退そのものを反映していると言えよう。

図2²⁾は連铸機の保有機数の推移を示したものであるが、10年前に比べ連铸機の増加がいちじるしく、連铸技術の進歩と普遍化を物語り、最近における鉄鋼中進国の

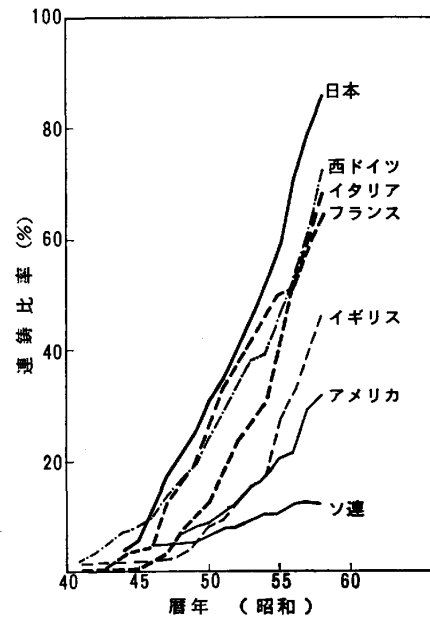


図1 各国の連铸比率の推移

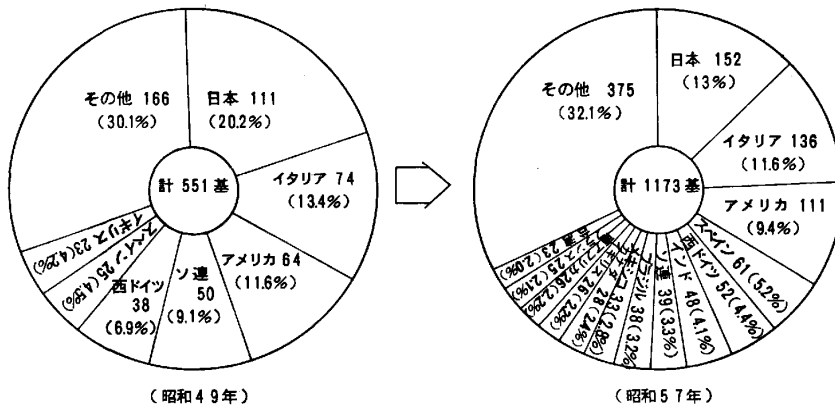


図2 各国の連铸機の保有基数の推移

昭和59年12月28日受付 (Received Dec. 28, 1984) (依頼展望)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

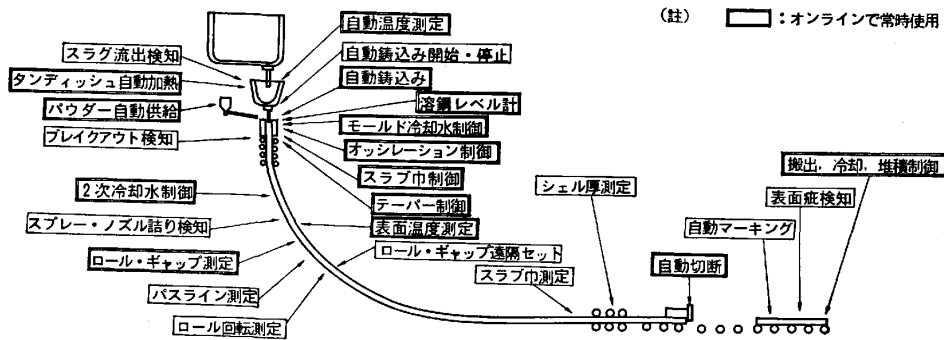


図3 連铸機の主な計測・制御システム

表1 連铸技術の進歩

		主な技術の内容
1	生産性の向上	高速鑄造，多連鑄，鑄片の大断面化 鑄造時間率の向上
2	鑄片品質の向上 (1) 非金属介在物の低減 (2) 内部品質（内部割れ， 偏析）の向上 (3) 表面品質の向上	溶鋼の清浄化，タンディッシュ技術 電磁攪拌，2次冷却の制御 鑄型内技術，パウダー技術， 2次冷却の制御
3	適用鋼種の拡大	リムド鋼相当材，シームレス鋼管， その他多くの合金鋼
4	自動化・省力化	計測・制御技術
5	圧延直結プロセス	表面品質の向上

表2 連続铸造法の長所

1	歩留りの向上	鋼片歩留り 96~99%， 造塊キルド鋼より約 15% 向上
2	省エネルギー	分塊-圧延法に比し 1/2~1/4 の 省エネルギー
3	省力化・機械化	作業環境の改善とオペレータの 肉体的負荷の軽減，自動化
4	建家面積の減少	造塊法の 1/3 以下
5	その他	鋼材の均質化と品質向上 消耗資材費の減少

きびしい追い上げの原動力となつていることを示している。これらの事実から，鉄鋼先進国としてのわが国の地位が危うくなりつつあることが理解できよう。

3. 技術進歩の足あと

鑄型振動を基本とした現在の連铸法としてその開発当初には茨の道があり，今日の整つた姿となるためには多くの労苦があつた。欠点を克服し，長所を伸ばすために重ねられてきた努力の跡をまとめると表1のようになる。初期には不安視されていた生産性や品質も大きな努力によつて解決され，それを基礎に適用鋼種の拡大，連铸比率の向上が達成されている。ただ，たとえば電磁攪拌のように，連铸の技術水準の向上に伴いその活用範囲が狭められてきた技術もあり，今後新技術の開発と既存技術の淘汰が併行して進むことになるだろう。

造塊法の場合，凝固過程がブラックボックスの中で進行するのに比べ，連铸法では凝固過程の制御が比較的可能である。さらには，冶金的要因の解明，計測・制御技術の進歩とがあいまって連铸法の自動化，省力化はいちじるしい進歩を遂げている。図3は現在利用されている主な計測・制御システムを示したものであるが，プロセス全体にわたり多くの技術が活用されていることが分かる。しかも，将来の連铸技術の進歩は計測・制御技術お

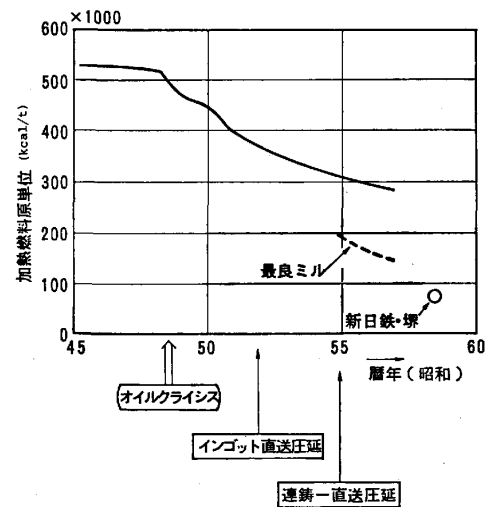


図4 国内のホットストリップミルの加熱燃料原単位（全国平均）の推移（新日鉄・堺³⁾の値には加熱電力も含む）

よび管理技術にかかっていると見えよう。

細部にわたるいろいろな技術の進歩が複合されて表2に示すような連铸法の利点が確認されているが，これらの利点のあるものは今後さらに大きな成果の結実をもたらすものと期待されている。図4²⁾は国内のホットストリップミルの加熱燃料原単位の推移を示したものであるが，熱延技術の進歩の寄与もあろうが，それ以上に連铸法の寄与が大きく，その技術改善に比例して燃料原単位が低下していることを物語っている。しかもこの進歩は

まだ飽和点に達しておらず、広い発展の余地を残しているように思える。

4. 残されている課題

多くの鋼種が連铸法で造られるまでに技術は進歩し成熟しているように見えるが、より高い目標を勝ち取るためにはまだいくつかの課題が残っている。個々の要素技術あるいは全体の技術の行く手に立ちほだかるいくつかの障害のうち主なものは次のようなものであろう。

4.1 鑄片の表面欠陥

連铸鑄型内では、水冷された金属の冷却壁、冷却壁と溶鋼の緩衝剤とも言える酸化物の液体層と固体層、高温の溶鋼と凝固したシェルのように多相層間の複雑な相互関係がある。

一方、鋼の結晶化および冷却過程も単純ではない。図5⁴⁾に示すように、大部分の実用鋼では δ 相が晶出したあとで包晶反応により $\delta \rightarrow \gamma$ の相変態を通過し、さらに $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を経て常温に至る。この間平衡分配係数の小さい元素の偏析、結晶粒の成長、化合物(窒化物、硫化物、炭化物)の析出反応が凝固条件および冷却条件を影響因子として進行している。

代表的な表面欠陥としては縦割れと横ひび割れがある。このような割れが鑄片に現れると手入工程などその後の複雑な工程を余儀なくさせる。縦割れは鑄型内での不均一凝固と周方向応力が原因となつて発生すると考えられている⁵⁾。さらに図5に示すようにC濃度がこうした割れに関係し、包晶反応や γ 粒粗大化が大きな役割を演じていることも分かつてきた⁴⁾。

鑄片に矯正点付近で発生する横ひび割れは、図6⁶⁾に示すような鋼の高温特性に依存し、窒化物の粒界析出⁶⁾および炭化物の粒内析出⁶⁾が原因となる粒界脆化によつて説明できるようになつてきた。さらに前述した包

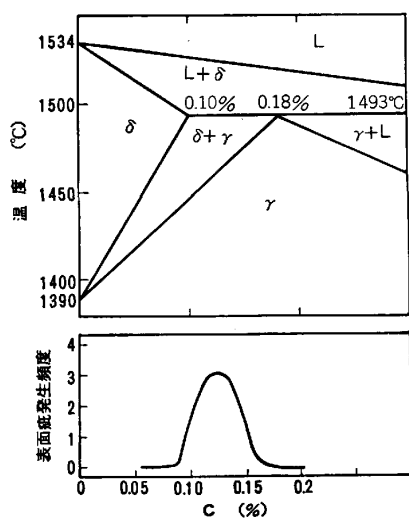


図5 Fe-C 状態図および鑄片の表面割れにおよぼすCの影響の模式図

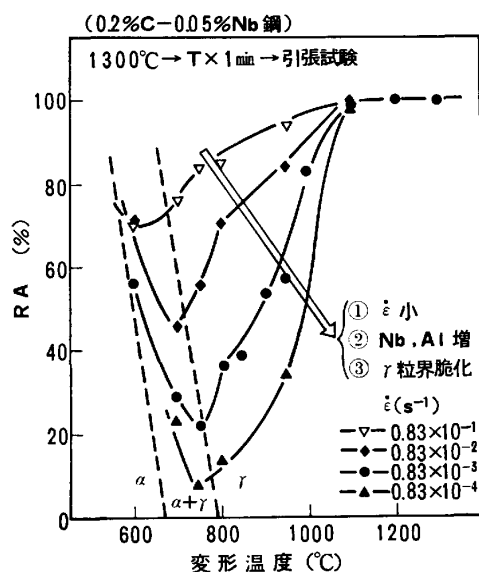


図6 いろいろな歪み速度におけるRAの変形温度による変化

晶反応や粒成長がこうした割れ感受性に関与していることも見逃せないだろう⁴⁾。このように、結晶粒の大きさや粒子の析出が鑄片の表面性状に強く影響するので、表面品質が100%保証される鑄片を得るには鋼の特性に応じた凝固-冷却条件が必要となる。

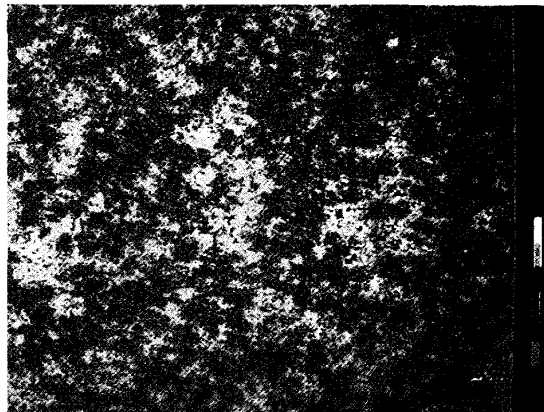
一方、鑄型内ではきわめて複雑な現象が起こり鑄片の表面品質に直接影響しているにもかかわらず現象の科学的解明は不十分であり、経験の域を出ていないのが現状と言えよう。さらに、2次冷却の方法として合理的とはいえず、非常にデリケートな冷却条件が要求される鋼種についてはその対応に苦慮することもしばしばである。

以上のように、鑄片の表面品質については科学的な解明の待たれる部分が多く、それだけ技術改善の余地が多く残されているとも言えよう。

4.2 中心偏析

理論的に予想されるデンドライト樹間の偏析よりもはるかに大きい中心偏析は、鑄片のバルジングや凝固収縮に基づく溶鋼の流動によつて起こることは確かである^{9)~11)}。連铸機の整備技術の進歩、電磁攪拌による鑄片の組織の改善などによつてこうした流動の防止技術は着実に進歩してはいる。しかし、写真1¹²⁾に見られるように、中心偏析でとくに問題となるPの偏析は初期濃度の100倍以上に達することも稀ではない。たとえば耐HIC鋼のような鋼材にはこうしたいちじるしい偏析は許されないので、中心偏析を減少させるために、溶鋼中のP濃度を低くすることが鑄片の高温での長時間の拡散熱処理など大幅なコストアップを招く工程の組込みを余儀なくされることがある。

中心偏析は防止できないのか? 流動と中心偏析の関係が定量的に明らかにされていない現状では正確な答は



P の初期濃度：0.016 wt%，マッピング：青～0.01 wt%，
 空色～0.05，緑～0.1，黄～0.15，赤～0.2，
 ピンク～0.25，白 0.25～，最大 2.131 wt%

写真 1 連铸スラブの中心偏析部に見られる P の分布の 1 例（幅中央部の L 断面）

難しい。しかし、大きい静鉄圧を受ける長い未凝固铸片を精度よく支持できる技術が開発されない限り、非常に困難であると言えるのではないだろうか。

4.3 内部割れ

問題となるのは、高速铸造の際に発生しやすい凝固界面割れであり、凝固界面に許容値以上の引張り歪みが生じデンドライト樹間が開口して濃化溶鋼が吸引されて生ずる。铸片の凝固界面に生ずる歪みを理論的に計算し、内部割れ発生との関係を解明しようとする研究は数多く試みられてはいるが、決定的なものはいまだしの感がある。しかし、凝固界面に生ずる歪みを小さくするためのロールピッチの短縮、分割ロール、多点曲げ、多点矯正、圧縮铸造などの設備技術の進歩があり、割れ防止の技術は大きく前進している。

今後は、さらに増加するかも知れない铸造速度、铸片のエネルギー保持のための高温出片操業、内部割れの発生しやすい形式の連铸機などに対応する内部割れ対策として前述の諸技術の熟成が必要となってくるだろう。

5. 次の目標は？

連铸比率向上の次の目標は？ 連铸法の一つの特徴は図 4 に示したように省エネルギー・プロセスである。溶鋼から受け継いだエネルギーをそのまま保持できれば、加熱炉を経ることなく直接圧延できるだけのエネルギーを铸片は保有している。こうした直接圧延法（CC-DR 法）は多くの工場で試みられつつあるが、新日鉄・堺製鉄所で得られた成果を示すと次のようになる^{3)13)~15)}。

CC-DR 率……94%（工場平均）

熱延のための全加熱エネルギー原単位……78 200 kcal/t（新日鉄全社平均 239 000 kcal/t）

連铸-圧延時間……30 min（従来連铸法、72 h）

この例が示すように、連铸法の次の目標が CC-DR 法であることは間違いない。このプロセスの実現によっていちじるしい省エネルギーが達成されるばかりでなく、(1)生産時間の短縮、(2)生産ラインの単純化、(3)労働生産性の向上、(4)鋼材の受ける冶金学的メリット、等多くの利益を享受できることになるだろう。

一方、このプロセスの実現には、

- (1) 無欠陥铸片の製造技術
- (2) 圧延に必要な铸片温度を確保する技術
- (3) 铸片の幅変更技術
- (4) 生産工程管理システム

といった高度技術の完成が必要不可欠となつている。従つて、完成度の高い近代製鉄所がこの CC-DR 法によつて一気に衣替されるとは期待し難い。工場のレイアウト、物流システム、鋼種構成、鋼種によつて異なる铸造技術など、高いハードルが行く手に数多く待ち受けている。このため、この理想的プロセスが広範囲に普及するには多少時間を要するかも知れない。

それでも、目標がそこに存在することはまぎれもない事実である。

6. 新しい展開を求めて

鉄鋼需要の停滞、中進国の追い上げ、本格的な設備リフレッシュ時期の接近など、鉄鋼業を取り巻く環境はばら色ではないと言われている。そのためにいろいろな対応策が検討されつつあるが、連铸技術とて例外ではなく、そうした危機意識が原動力となり世界的な規模で新しいプロセスの開発競争が繰り広げられつつある。

現在の連铸法に代わり得るプロセスに要求される主な条件をまとめると図 7 のようになる。CC-DR 法は現連铸法の理想像ではあるが、その設備費が高いなどの欠点をもっていることも事実である。たとえば、設備費が少なくしかも途中の圧延工程も大幅に省略できるような小断面の薄铸片が铸造できる連铸機が開発されれば、製品のコスト・ダウンは火を見るより明らかであろう。

こうした新しい連铸法の開発が多くの国々で試みられていると取りざたされている。多くの方法が試みられているようではあるが、生産性の高いプロセスの完成の声

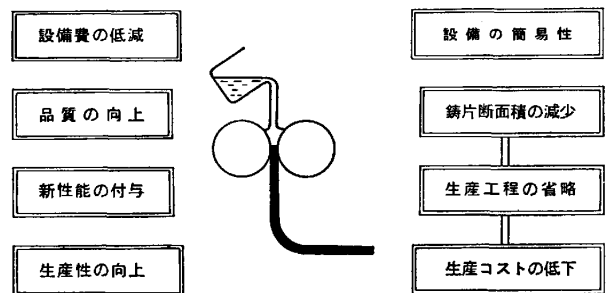


図 7 新しい連铸法に要求される課題

は聞かれない。今後とも多くの努力が費やされるだろうし、またいつの日かそうした努力は報われるだろう。

7. お わ り に

日本の鉄鋼業の競争力は減衰しつつあると言われている。たしかに、中進国の追い上げ、ぼう大なスクラップを背景としたアメリカ鉄鋼業の復活など、裏付けとなるデータが多くなりつつあることは確かである。果たして競争力を増強する手段は残っていないのだろうか？ 声を大きくして否定したい。略述してきたように、連铸プロセスの改善によつて、連铸工程だけでなく生産プロセス全体が合理的に再構築され得ることは疑う余地がない。これまでは、相変態である凝固現象に支配されてきたように見られるが、これからは、それを支配し制御する方向に向かうべきであろう。凝固過程を支配し、連铸プロセスを確実に制御できるまでに技術水準が向上すれば、少なくとも鉄鋼生産ラインの半分は大きく変貌し、強い競争力を身につけられるに違いない。

そうした輝かしいゴールに到達するには多くのハードルのあることは覚悟しなければならない。とくに、個々の要素技術の完成に必要な凝固現象および冷却過程の諸現象についての基礎研究、要素技術を組み合わせるための計測・制御技術、全ラインを見通した管理システムなどが重要なポイントとなつてくるだろう。

高度成長期のチャンピオンであるわが国の鉄鋼業はた

しかに次の時代の新しいレースに突入している。しかし、頭一つ確実にリードし、強力な体力を温存しているわれわれに栄光のロープを切れないはずがない。

文 献

- 1) 鉄鋼統計委員会: 鉄鋼統計要覧
- 2) 西沢一彦: 日本鉄鋼協会関西支部湯川記念講演会 (昭和 58 年 9 月)
- 3) 鉄鋼界報, 昭和 59 年 10 月 11・21 日
- 4) 前原泰裕, 安元邦夫, 杉谷泰夫, 郡司好喜: 鉄と鋼, 71 (1985) No. 11 又は No. 12 掲載予定
- 5) 杉谷泰夫, 中村正宣: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1702
- 6) Y. MAEHARA and Y. OHMORI: Mater. Sci. Eng., 62 (1984), p. 109
- 7) 鈴木洋夫, 西村 哲, 山口重裕: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 2038
- 8) 高石昭吾, 小舞忠信, 野呂克彦, 秋田靖博: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 915
- 9) 熊井 浩, 浅野鋼一, 大橋徹郎, 野村悦夫, 藤井博務: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 894
- 10) 佐々木寛太郎, 杉谷泰夫, 石村 進: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 53
- 11) K. MIYAZAWA and K. SCHWERDTFEGER: Arch. Eisenhüttenwes., 52 (1981), p. 415
- 12) 橋尾守規, 川崎守夫, 中島敬治: 未公表
- 13) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 79 回製鋼部会 (1981 年 7 月) 新日本製鉄 (株) (私信)
- 14) 松永 久, 吉井正孝, 貞広真二, 齊藤 実, 福田武幸: 製鉄研究 (1984) 313, p. 1
- 15) 新日本製鉄 (株): 鉄の話題, 47 (1984), p. 24