

技術報告

UDC 669.187.25 : 669.046.5 : 621.74.047

電気炉-LF-全ブルーム連続铸造技術

根本秀太郎*・川上 公成*²・池上 能右*³角南英八郎*³・玉応雄一郎*³

Electric Arc Furnace, Ladle Refining Furnace and all-Bloom Continuous Casting Process

Hidetaro NEMOTO, Kiminari KAWAKAMI, Yoshisuke IKEGAMI,
Eihachiro SUNAMI, and Yuichiro TAMAO

Synopsis :

Since November 1978, a ladle refining furnace with 100 t capacity has been operating at Sendai Works of Azuma Steel Corp. Through the EF-LF-Bloom CC process, high quality rod and wire for cold-drawing, cold-heading, heat-treatment or machining have been produced successfully instead of using the conventional ingot casting process. The process is very effective for deoxidation, desulfurization, lowering of inclusion content and precise control of chemical composition and temperature.

Application of Ar-sealing, electromagnetic stirrer and super heat control technique to the large section and bending radius CC machine, combined with EF-LF process, gives clean, good-surface and homogeneous steel. EF-LF-all CC process gives a higher alloy yield, productivity and a lower cost (electric-power, electrode, refractories and fuel), compared with the conventional EF-CC process.

1. 緒 言

(株)吾嬭製鋼所の仙台製造所は宮城県仙台新港に面した敷地 60 万 m² に、昭和 49 年に竣工した新工場である。全所レイアウトは、水利の便、原料の入荷から圧延製品の出荷まで製造工程、物流の流れが円滑になるよう配慮され、軟、硬線材、機械構造用炭素鋼並びに合金鋼、快削鋼など幅広い鋼種の条鋼、線材用素材を電気炉、レードルファーネス、100% 連続铸造により製造し、品質の安定、省力、省エネルギーの実を上げつつある。

昭和 55 年 3 月には 100 t 電気炉 1 基でレードルファーネスを通し、すべてのチャージが連続铸造により 58 000 t のブルームとして月間製造するに至った。

熱ブルーム (280 mm × 350 mm 断面) は直ちに連続加熱炉に装入され、115 mm φ ピレットに圧下され、表面、内質の健全化を図っている。

分塊に際しての加熱炉燃料原単位は 13 万 kcal、分塊

歩留りは 98.5% 以上を維持し、ピレットの約 40% は表面無手入れのまま次工程の線材圧延に送られ製品化される。

以下、仙台製造所における電気炉・レードルファーネス、連続铸造の組み合わせによる棒鋼線材素材の製造状況について述べる。

2. 製鋼工場の設備概要

当製造所の全所レイアウトは Fig. 1 に示すように製鋼用主原料 (スクラップ、銑鉄、副原料など) の入荷から圧延、製品の出荷まで製造、運搬工程を十分配慮して物流が U の字型一方向になっており合理的に処理されている。

現在当製鋼工場において軟、硬鋼線材、冷間圧延用炭素鋼線材、機械構造用炭素鋼、合金鋼、快削鋼など幅広い鋼種の条鋼、線材用素材をすべて電気炉-レードルファーネス-連铸機ライン (以下それぞれ EF, LF, CC と述べる) で安定して製造し電気炉 1 基で月間 55 000 t 以

昭和 55 年 10 月 20 日受付 (Received Oct. 20, 1980)

* (株) 吾嬭製鋼所 仙台製造所 工博 (Sendai Works, Azuma Steel Co., Ltd., 1-6-1 Minato Sendai 983)

*² 日本鋼管(株)技術研究所 工博 (Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)

*³ (株) 吾嬭製鋼所 仙台製造所 (Sendai Works, Azuma Steel Co., Ltd.)

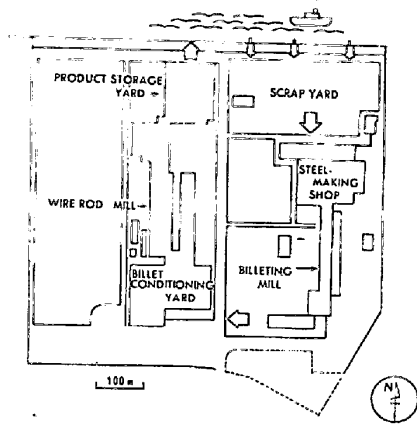
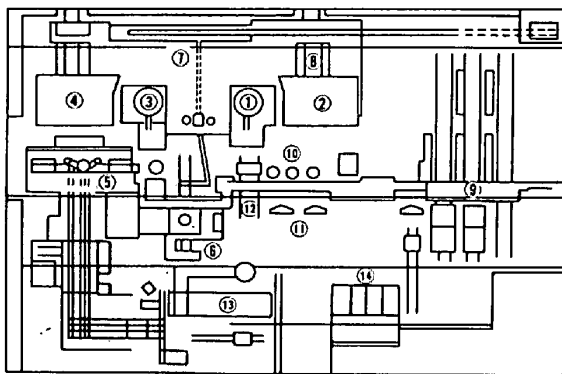


Fig. 1. Layout of Sendai Works.



- ① No.1 Electric arc furnace
- ② No.1 Operating room and Transformer room
- ③ No.2 Electric arc furnace
- ④ No.2 Operating room and Transformer room
- ⑤ Continuous casting machine
- ⑥ Ladle furnace
- ⑦ Flux bunker
- ⑧ No.1 Scrap bucket transfer pit
- ⑨ Bottom pouring machine
- ⑩ Preheating station of ladles
- ⑪ Tundish preparation
- ⑫ Tundish transfer
- ⑬ Reheating furnace
- ⑭ Soaking Pit

Fig. 2. Outline of steelmaking plant.

上の能力を有するに至っている。

製鋼工場のレイアウト、設備仕様をそれぞれ Fig. 2, Table. 1 に示す。その特長の主なものは次のとおりである。

(1) 高能率化

製鋼工場生産の基点である EF を、UHP とし、これに助燃バーナ、誘導攪拌装置を付備し高級鋼化、高能力化設備とした。他設備もこれと整合するものとし、さらに、EF を内側に 2 基並べ炉用トランスをそれぞれ外側にして、副原料貯蔵投入設備、誘導攪拌装置の電源をはじめ、チャージングカー、電極接続機などまで共有でき、設備自体が高効率で稼動することが可能である。

(2) 省エネルギー化

製鋼、分塊両工場が直結しており CC プルームがトランスファーで直接熱片として加熱炉に装入され省エネルギーが計られ、炉用トランスの大容量送電、直落し方式と

Table 1. Specification of steelmaking plant and billeting plant.

Facility	Item	Specifications
Electric arc furnace	Type	NKK-670MH
	Capacity	100t (max 120t) UHP × 2
	Transformer capacity	58,000KVA/EF
	Stirrer	ASEA Electromagnetic stirrer/EF
Ladle furnace	Computer	Facom U-200
	Burner	Jet burner × 3/EF
	Dust collector	14,000m ² /min
Ladle furnace	Type	DAIDO Ladle furnace
	Transformer capacity	16,000KVA
	Bubbling	Ladle bottom, Argon 0 ~ 500 ℓ/min
Continuous casting machine	Type	Manessman-Demag bow type
	Strands	4 strands
	Bending radius	15mR
	Mould	280mm × 350mm × 700mmH curved mould
Reheating furnace	Electromagnetic stirrer	2 stirrers / strand
	Bloom length	3,850mm ~ 5,850mm
Reheating furnace	Type	DAIDO Walking beam
	Capacity	160t/h (hot charge)
Roughing mill	Type	2 High reversing
	Motor capacity	4,000 KWA
Finishing mill	Type	Tandem vertical — Horizontal
	Motor capacity	V 1,000KW
		H 1,000KW

し励磁電力、送電損失の防止なども配慮されている。

(3) レードルファナーの導入

昭和 53 年秋まで電気炉 2 基整備 1 基稼動にて生産していたが大型、高能率容量の電気炉と連続铸造との連繫を再考慮し、一層の品質向上 (脱酸、脱硫強化、窒素ピッキング防止、成分範囲向上、介在物などの総合対策)。

原価低減 (合金鉄歩留り、耐火物、省エネルギーなど) 生産性向上を目的として、LF の導入を実施した。LF 法は炉外精錬法の一つでスラグ精錬重点プロセスで取鍋内を不活性ガス雰囲気を保ち、任意のスラグ組成成分をアーク加熱によつて造滓しながらスラグ精錬を行う方式であり、アルゴンパブリングによつて溶鋼とスラグの攪拌を十分に行い反応促進を図るとともに温度の均一化、成分調整を行うものである。設置場所は既存のレイアウトの余地を利用し、EF-LF-CC と製造工程が円滑に流れる箇所とした。また大きな駆動部分は台車だけで傾動、除滓、加熱、精錬がこの台車ですべて処理可能となっており、さらに将来、真空処理装置が設置できるようになっている。

(4) 連铸機設備

連铸機設備仕様は Table. 1, 断面概要を Fig. 3 に

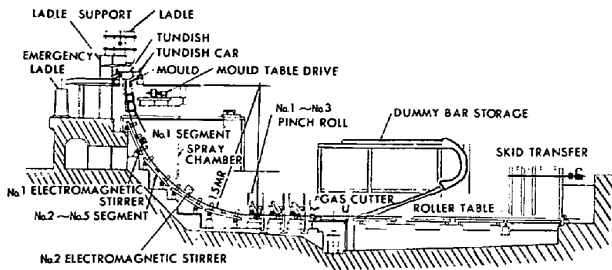


Fig. 3. Outline of continuous casting machine.

示すが、条鋼、線材用素材生産を考慮し下記項目の特長がある。

① 铸片断面寸法：铸片断面寸法は 280 mm × 350 mm で、扁平比 1.25 としブルーム中心部欠陥の分散を図り、さらにブルームの、線材、条鋼製品に対する減面率を、 $280 \times 350 \rightarrow 5.5 \phi \sim 50 \phi = 99.8 \sim 98\%$ と大きく取り、ブルーム内部のポロシティの消滅を目的とした。

② 大湾曲：曲率半径を大きくし介在物の浮上性を向上させるとともに曲げに対する内部歪みを低減して垂直型連铸機の機能とほぼ同等とし、垂直型の欠点である機高を抑えるとともに 1.2 m/min までの高速铸造も可能とした。

③ モールド：全湾曲連铸機であるのでモールドも湾曲しているがコーナは直角とした。

この決定にあたり事前に分塊圧延のプラスチックによるモデル試験を行い、適切なカリバー設計、パススケジュールの条件下では圧延の折込み疵に対してコーナが直角でも問題が無いことの確証を得てきた。直角であることは述べるまでもなくモールド各側板の形状が単純化され、モールドの冷却が容易に均一、かつ強化され寿命の延長が図られ、モールド鋼側板を研削したり、組み立てたりする上で単純で整備性に優れた方式である。

④ バルジング量、歪み：従来、フートロール、No. 1 セグメント、No. 2 セグメントまでで長辺ロールが 11 段、短辺ロールが 4 段で低比水量操業時には 2 mm 前後のサイドバルジングが発生し、若干の内部割れを誘発する場合があったので、最近製造鋼種の融通性を加味して長辺 12 段、短辺 10 段と増加しサイドバルジングを最大でも 1 mm 以下、バルジング歪み 0.3% 以下として内質面で安全率を高く取つたものとした。

⑤ 電磁攪拌装置：更に製造鋼種の高級化指向に対処するとともに電気炉の高酸素使用操業による製造能力向上に铸造条件が容易にマッチングし得るように電磁攪拌装置を導入することとし、55 年 9 月末日に完工した。

設備箇所は Fig. 3 に示す。リニヤタイプ型を各ストランド上、下の 2 段に設置し、上部でデンドライトを切

Table 2. Comparison of EF process and EF-LF process.

		EF process	EF-LF process
Cost	Electric power	100	95
	Electrode	100	90
	Yield Mn	100	114
	Si	100	106
	Al	100	180
	Refractory EF Ladle	100	70
Productivity	Productivity	100	135
	Temperature control	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
	Casting-complete	99.1%	99.4%

断して铸造下方にシャワーリングし下部攪拌で再分散を図り偏析などの内部欠陥の発生を完全に抑えることを目的としている。

⑥ 電気炉-レードルファーネス-連続铸造の総合操業

レイアウトでも判断できるように EF の出鋼、取鍋受鋼作業から LF と CC の連絡、EF と LF のスラグパン交換、取鍋整備、消耗資材運搬、各準備作業などを含めてすべてのハンドリングを重クレーン 2 台、軽クレーン 1 台の搬送設備で基本ダイヤを組み運行し、溶鋼温度管理を厳守している。例えば、空取鍋での待ち時間の熱損失、受鋼溶鋼の煉瓦からの放熱防止と、溶鋼温度の安定化を図るべく 4 基の鍋回転で行っており、熱効率の面でも効果を上げている。常に連铸の铸造開始を基点とする溶鋼温度の作業管理により非常時の普通塊の発生はほとんどなく、チャージ 300 kg 以上のタンディッシュ、および取鍋内の残鋼発生も 0.2% 程度と良好な成績を収めている。

EF-LF-CC プロセスの中における LF 導入の効果を原単位、生産性の面からまとめると Table. 2 のようになる。

3. 製鋼工場の操業結果

当製鋼工場において幅広い鋼種を溶製するため、品質向上を目的に種々の操業上の改善を加えてきたので以下に述べる。

3.1 脱酸

Si, Mn, Al の強制脱酸によつて生成した大型の脱酸生成物は Ar バブリングによつて LF 前期でほとんど浮上分離され、全[O]は大きく減少する。LF 終了時には、全[O]は 20 ppm 程度に減少し、15 μm 以下の小型介在物がわずかに残るのみとなる。LF 後期の全[O]の減少は取鍋蓄および Ar 雰囲気での大気の遮断によつてスラグ酸化度 (FeO+MnO) が安定して 1% 以下が得ら

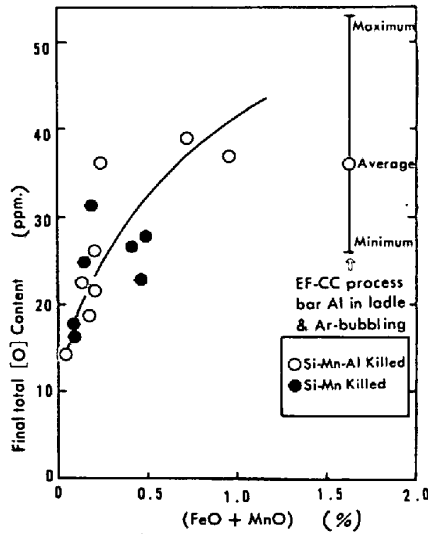


Fig. 4. Effect of (FeO+MnO) content of slag on final total oxygen content.

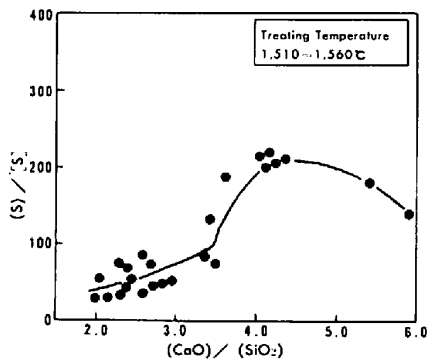


Fig. 5. Effect of slag basicity on (S)/[S].

れること、さらに Ar 攪拌によつてメタル-スラグ界面反応がすばやく進行することにより成品での全 [O] は 15 ppm 以下も可能である。

Fig. 4 に成品の全 [O] におよぼすスラグの (FeO+MnO) の影響を示す。

3.2 脱硫

Fig. 5 に S 分配比とスラグ塩基度の関係を示す。

当然のことながらスラグ塩基度 (CaO)/(SiO₂) の上昇とともに S 分配比 (S)/[S] が大きくなる。CaO-CaF₂ 系フラックスを増量しスラグ塩基度を 3.4 以上にした場合、4.2 近傍に (S)/[S] の極大値がみられるが 5.0 を越える高塩基度スラグにおいてはスラグ融点が高いため滓化が不十分となり、(S)/[S] が低下する。初期 [S] が 0.025% の鋼につき、処理温度 1 510°~1 560°C において CaO-CaF₂ 系フラックスを用い、スラグ塩基度を 4.2 にすると、脱硫率は 84% の高い値が得られている。

3.3 成分調整 (Al 調整)

LF 精錬時に取鍋内を非酸化性雰囲気にするこによつて合金鉄の歩留りが安定し、かつ底吹 Ar 攪拌によつて成分の均一化が早く行われるので、C, Si, Mn, Al の添加はすべて LF において行われ、しかも、成分適中の精度向上のために 2 回にわけて添加することが可能となつた。第 1 段は脱酸を主目的とした Al 添加、第 2 段は [sol. Al] 調整を目的とした Al 添加である。

Al の添加方法は Al ワイヤーフイダー法を採用し、Al の大気酸化およびスラグによる酸化を抑制している。さらに CC での再酸化による [sol. Al] の損失を防止するために 3.4, 3.5 に述べる無酸化鑄造を実施している。

CC での再酸化防止対策によつて [sol. Al] 損失は平均して 0.012% から 0.003% に減つた。

また上記の LF での [sol. Al] 調整および CC での再酸化防止対策によつて [sol. Al] のばらつき (σ) は低炭素アルミキルド鋼において、EF-CC プロセス時代の 0.016% から 0.007% に低下した。

3.4 窒素の低減

[N] 低減操業としては (1) スクラップの選択、(2) EF での酸素吹込量の増加によつて脱炭反応に伴う脱窒の促進、(3) EF 未脱酸出鋼および取鍋内 Ar 置換によつて出鋼時の [N] 吸収抑制、(4) LF での取鍋蓋および Ar 雰囲気による大気の遮断、(5) [N] 含有量の低い合金鉄、フラックスの選定、(6) CC でのロングノズル、Ar シールによる大気接触の防止など、を実施している。従来の EF-CC プロセスの Si-Mn 脱酸出鋼タイプに比べ EF-LF-CC プロセスでの未脱酸出鋼+取鍋内 Ar 置換タイプの方が出鋼時の [N] 吸収量が約 15 ppm 低下している。

3.5 介在物の低減

介在物対策としては (1) LF および CC 前温度調整時の、Ar パプリング、(2) 取鍋-タンディッシュ間の浸漬ロングノズルおよび取鍋ノズル-ロングノズル結合部の Ar シールによる無酸化鑄造、(3) セキ付タンディッシュの採用、(4) 介在物の吸着性のよいタンディッシュパウダー、モールドパウダーの使用、(5) 介在物が浮上しやすすいタンディッシュノズルの使用などを実施している。その結果オープン鑄造時に較べ再酸化量が 1/4 に減少していることが、[sol. Al] 損失量の減少から確認できた。

またタンディッシュノズルについては、縮尺 1/2 の水モデル実験にてストランド溶鋼流れを把握し、介在物が浮上しやすく、かつパウダーのまき込みがない 4 孔ノズルの形状を決定した。

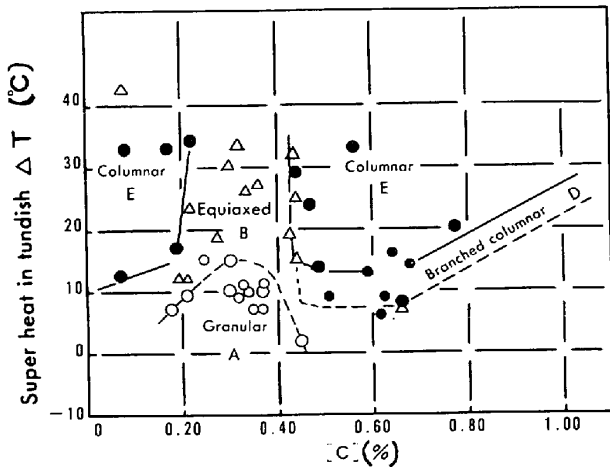


Fig. 6. Change of macro structure by super heat & C-content.

3.6 偏析の低減

鑄片の中心偏析は鑄造温度 (タンディッシュ内溶鋼過熱度を ΔT として用いる。)が 高く、鑄造組織で見ると、中心に向かつて柱状晶が発達するほど、偏析が強くなる。

この傾向について、線材製品全域をカバーする 0.05% から 0.8% までの [C] 範囲にわたって見ると、Fig. 6 に示すように分類できる。すなわち 0.23% [C] までは低い ΔT においても柱状晶となりやすいので、偏析を避けて鑄造温度を下げる必要があるが 0.23~0.43% [C] では比較的高温でも等軸晶もしくは粒状晶が得られる。0.43% [C] 以上になると再び柱状晶になりやすく、例えば 0.65% [C] では中心に柱状晶を生じないようにするために ΔT は 15°C 以下にする必要がある。

このように [C] 量によつて同一 ΔT でも中心部の鑄造組織が柱状晶 \leftrightarrow 自由晶に変化する現象は、凝固界面の直前において柱状晶凝固から等軸晶凝固への移動 (Columnar to Equiaxed Transition: 以下 C. E. T.) の条件が [C] 含有量によつて変化することを意味している。C. E. T. に関する最近の報告^{1)~4)}のうち、BURDEN⁴⁾は柱状晶先端の過冷度がある限界値を越えると C. E. T. が起こるとし、さらに過冷度が (1) 式で示されるとしている。

$$dT = \frac{G \cdot D}{V} - \frac{m \cdot V \cdot R}{D} (1-k) D_{\infty} + \frac{2\sigma}{R \cdot \Delta S} \quad \dots\dots\dots (1)$$

dT : 柱状晶先端の過冷度 G : 温度勾配
 D : 拡散係数 C_{∞} : 母液温度 m : 液相線勾配
 σ : 固液界面エネルギー R : 柱状晶先端の曲率
 ΔS : 界面のエントロピー k : 平衡分配係数

(1) 式において第 2 項の $(1-k)$ の値は Fe-C 系平衡状態

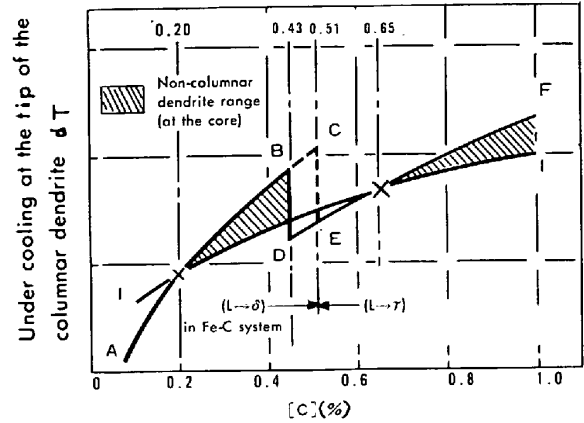


Fig. 7. Effect of L \rightarrow δ and L \rightarrow γ reaction on the under cooling and the core structure.

図において、初晶が δ の領域 ($[C] < 0.51\%$) と、 γ の領域 ($[C] > 0.51\%$) とで異なる値となる、従つて (1) 式で dT を概算すると Fig. 7 において A-B-C-E-F のように 0.51% [C] の点で不連続を持つ曲線となる。一方柱状晶凝固から等軸晶凝固へと遷移する限界過冷度については、現在のところ明らかではないが、当所において Fig. 6 に示すように 0.23~0.43% [C] において等軸晶組織が容易に得られ、また 0.65% [C] 以上で分岐状柱状晶や等軸晶が得られやすい傾向があることから、C. E. T. 限界過冷度は Fig. 7 において [C] % に対して I-I' に示すような関係を持ち、過冷度曲線 (A-B-C-E-F) と X 印点で交叉し、過冷度曲線が限界過冷度曲線 I-I' を越える範囲で C. E. T. が発生しやすいと考えられる。さらに実用鋼においては γ 初晶域の境界が 0.51% [C] から 0.43% に移動して A-B-D-F となつていていると考えられる。

当所に導入した電磁攪拌装置は前述したように、上下 2 段方式であるが、この適用によつてブルーム中心部に微細な自由晶が増加し、その結果ポロシティ、偏析度が減少した。Fig. 8 に示すように、柱状晶の生成しやすい 0.45% [C] 以上において、柱状晶の発生する下限温度を約 15°C 上昇させる結果を得ており、品質の向上とともに CC 操業の自由度を増している。

さらに、広い [C] 範囲にわたつて偏析の少ない良好な鑄造組織を得るため、低温かつ正確な鑄造温度調整を目標に次のような管理ポイントを置いている。(1) 取鍋の使用回数、空時間にもとづいた熱放散度補正。(2) LF におけるアーク加熱および Ar 攪拌による温度調整。(3) CC 前 Ar 攪拌による温度微調整。(4) タンディッシュ昇温方法の設定。(5) 鑄造スタート方法の規定などを実施している。その結果鑄造始めから終了までの溶鋼温度差は $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 程度である。

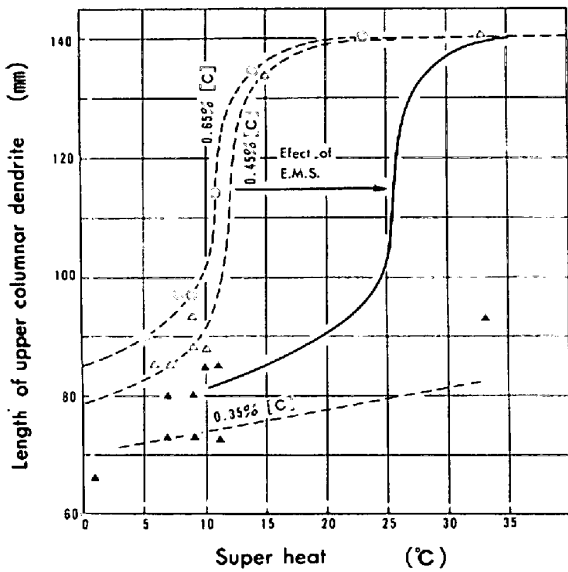


Fig. 8. Effect of EMS on the macro structure and super heat.

3.7 表面性状の改善

Al の過剰添加の防止や窒素の低減によつて、性状が安定してきたことから、AINの析出がブルームの冷却過程において表面を脆化していることがわかつたが、さらに冷却条件を弱冷パターンにすることによつて冷却過程のAINの析出を防止している。

高温において応力集中のもととなるオッシレーションマークの形状改善に対しても、熔融パウダーとオッシレーションサイクルを変えることによつて、マークの深さが浅くなる条件を求めて操業している。

鑄片の表面性状の良好なことから、鑄片はすべて鑄造後ただちに隣接する分塊加熱炉に装入されるので、平均装入温度は800°Cとなり、分塊加熱炉の燃料原単位は、130 000 kcal/tと低い水準で、しかも分塊後の115 mm φピレットにおける全鋼種の分塊歩留りは平均で98.5%以上を維持している。

さらに0.42% [C]以上の硬鋼線材向けは、分塊圧延後ピレット手入をしないで、そのまま線材工場の加熱炉へ装入することが可能な水準となつている。

4. 品質

4.1 冷間加工性

線材、条鋼は低炭素鋼から高炭素鋼まで、ユーザにおいて必ず伸線や冷鍛などの冷間加工を受ける。冷間加工性に影響する材料因子としては、強度水準、金属組織、化学成分、表面性状があるが、これらの品質特性の改善に対して、EF-LF-CCプロセスの組み合わせは非常に有利であり、さらに線材工場におけるステルモア設備に

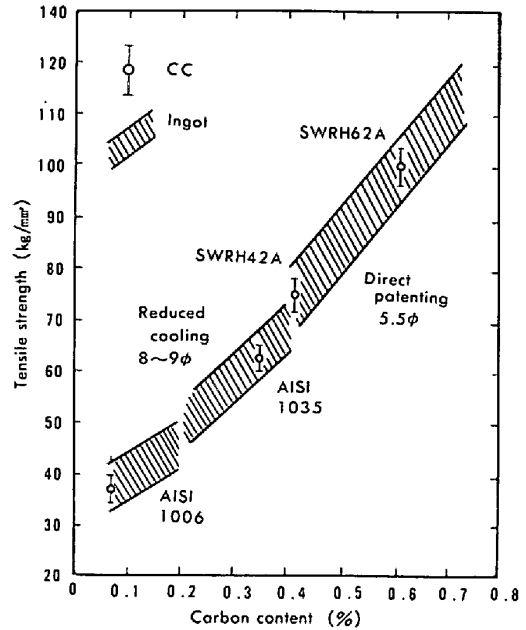


Fig. 9. Mechanical properties of STELMOR rod.

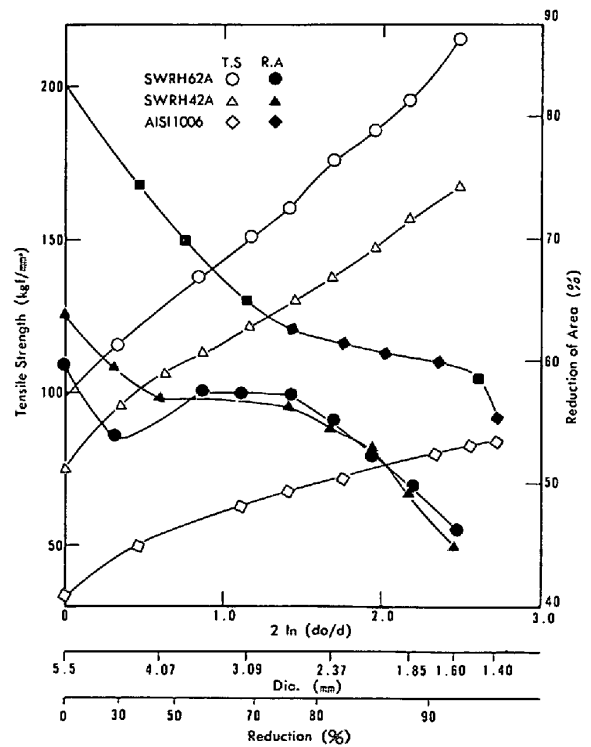


Fig. 10. Drawability limit.

よる冷却制御を行うことにより圧延のまま良好な冷間加工性を持つ線材が製造されている。Fig. 9 に示すように低炭素から高炭素までの圧延のままの状態での引張強さのばらつきが小さく、伸線性も、Fig. 10 に示すように圧延のまま、低炭素から高炭素まで良好である。冷鍛性についても、Fig. 11 に示すように圧延のままの中炭素鋼において優れている。

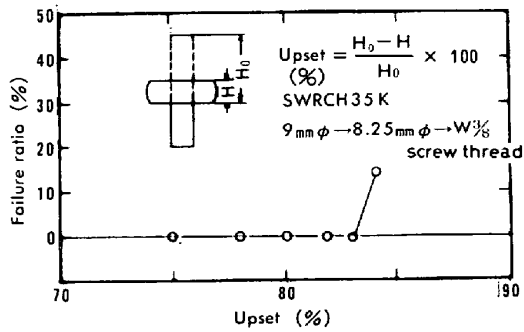


Fig. 11. Cold forgeability of asrolled rod.

4-2 焼入性

機械構造用炭素鋼および合金鋼においては焼入性のばらつきが小さいことが要求される。従来から報告されているように CC 材はチャージ内の成分均一性が鋼塊材に較べて、はるかに優れているが、さらに EF-LF プロセスの高い成分調整性を利用し、焼入性におよぼす合金成分の効果を統計的に処理した関係式を用いて、JIS で規定された焼入性バンドの中で、さらに狭い範囲のばらつきの焼入性を持つ材料を製造することができる。

Fig. 12 に SCM 435 のジョミニー端焼入性のチャージ間のばらつきの例を示す。

5. ま と め

(株)吾孺製鋼所仙台製造所は昭和 49 年に竣工、操業を開始したが、100t 電気炉 1 基稼動で月間 55000 トン以上のピレット製造が可能となつた。製鋼の全チャージ

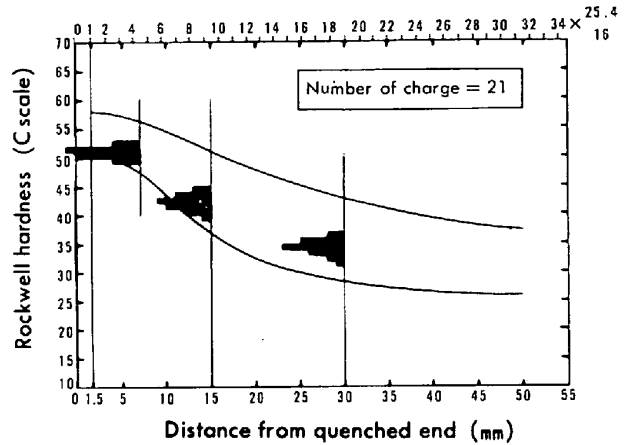


Fig. 12. End-quench hardenability of SCM 435.

は EF・LF・CC の組み合わせのプロセスにより、条鋼、線材の品質の向上、安定も含め、高能率、省力、省エネルギーを計り、その成果を挙げつつある。今後なお一層の努力によりさらに向上を計る所存である。

文 献

- 1) 鈴木 章, 長岡 豊: 金属学会誌, 33(1969), p. 658
- 2) R. D. DOHERTY, P. D. COOPER, M. H. BRADBURY, and F. J. HONEY: Met. Trans, 8A (1977), p. 397
- 3) D. FAINSTEIN-PEDRAGA and G. F. BOLLING: J. Crystal Growth, 28 (1975), p. 311, 319
- 4) M. H. BURDEN and J. D. HUNT: J. Crystal Growth, 22 (1974), p. 99, 109