

技術解説

Technical Review

特殊鋼の製鋼技術進歩

佐久間仁*

Progress on Steelmaking Technology of Special Steel

Hitoshi Sakuma

Synopsis

The technology for the environment became more important recently, Daido has developed the new processes for the energy conservation and the resource saving.

1) Total CC productivity in Chita plant has increased by introducing the new ladle crane in CC shop and new ladle transportation line from refining yard to CC shop.

2) A new caster named "PHC" (Promising Hybrid Caster) has been developed, which features semi-continuous, large cross section and vertical type. It has characteristics and advantage of both continuous casting and ingot casting process.

3) "DSM" (Daido Special Method for Dust Slag Melting) and "DSR" (Daido Special Recycle Process for Direct & Smelting Reduction) has been developed for the waste recycling by applying the technology of the electric furnace.

1. はじめに

大同特殊鋼(株) (以下、当社という)の主力生産拠点である知多工場の製鋼の歴史を振り返ると1980年代に業界に先駆けて、連続鋳造(以下CC)と取鋼精錬装置(LF)を設置し、電気炉-LF精錬-RH脱ガスの複合精錬技術とCC技術を結合させたELVACプロセスを構築し、高品質な特殊鋼の造り込みを可能とし、特に自動車用特殊鋼における当社の地位を確固たるものにした。次期1990年代にはステンレス鋼の精錬プロセスであるAOD(アルゴン酸素脱炭装置)に真空機能を付与して進化させた新精錬プロセスVCR(Vacuum Converter Refiner)や丸断面垂直CCが開発導入され、幅広い鋼種をフレキシブルに生産できる特殊鋼一貫製造工場へと発展させてきた。

2000年代に入り、製造プロセスに要求される技術は、これまでの高品質、低コスト、効率生産技術に加え、CO₂削減を中心とした省エネルギー、省資源といった地球環境調和のための技術がますます重要になっている。省エネルギーという点では、高歩留りであるCCの生産

性を高めるための新設備導入や操業改善を行ってきており、電気炉ではCO₂排出量の少ない操業法へ転換してきている。また、省資源の点では、最近の鉄スクラップや合金価格高騰問題もあり、資源の活用技術の開発、また廃棄物の低減のためのリサイクル技術開発を行っている。

本稿では、当社における最近の製鋼関連の主な技術動向および成果について紹介する。

2. 資源活用技術の進歩

(1) 低廉鉄スクラップの活用

従来、特殊鋼電気炉では鉄スクラップの中でも品位の高い新断を主体に使用していたが、最近では使用比率の少なかったドライ粉や甲山のような低廉鉄スクラップ活用や新しい鉄源の開拓に注力をしてきている。ドライ粉(切削屑)は低嵩比重ということでハンドリングが悪く、使用比率を高めると電気炉への装入回数が増加し能率低下の要因となるため、従来は使用量を制限していた。しかし、鉄スクラップの輸出が増加する中、ドライ粉は低嵩比重のため船積みには不利であることより国内で比較

的入手しやすい銘柄である。このドライ粉の使用量を拡大するため、プレス/切断処理設備を活用して、嵩比重を向上させて、電気炉使用時のハンドリングを向上させ、また鉄源装入用バスケット容量確保により甲山の使用量も増加させることもでき、低廉鉄スクラップの使用比率を30%以上まで拡大させている。

(2) 大容量貯留技術

低廉鉄スクラップに多く含まれる不純物 P,S については精錬プロセスで除去できるが、銅のような精錬では除去できない不純物については、大容量貯留炉にて混合均一化して電気炉各チャージのばらつきを吸収するプロセスを開発している。安価な夜間電力時間帯に70トン電気炉で溶解したものをいったん700トン貯留炉 SV (storage vessel) に溶銑状態で保持し、昼間の高い電力時間帯に電気炉へ戻し他の鉄スクラップとともに溶解させ、電力単価差のメリットを得る。また、低廉鉄スクラップ活用のための有効な技術の一つである。

(3) 社内発生スクラップの分別強化

ニッケルやモリブデンのような有価元素を最大限に活用するためには、成分がはっきりしている社内発生スクラップは、同一鋼種に使用するのが望ましく、特に有価元素を多量に含む高合金スクラップについては社内の各プロセスで発生するスクラップを溶解する工場に戻して該当鋼種へ使用することを全社的に展開している。スクラップ発生元での分類の細分化を進めてきているものの非常に多い鋼種を扱っているためグルーピングして統合回収しているものがある。その場合には統合して回収したスクラップを使用前に磁選や携帯 X 線分析装置を活用してさらに精度高い分別を行い、有価元素の回収を図っている。

(4) 鉄源の造粒化技術

従来、社内発生副産物であるスケールについては電気炉へバラの状態での直接装入、また集じんダストについ

ては廃棄物として埋立処分されていたが、バラ装入でのロスを低減し鉄源としてのリサイクル率を向上させるために、造粒機を導入してペレット化して電気炉で溶解する方法を開発した。当設備を PRIME (Fig.1, Fig.2) と命名したが、Premium Resources with Innovative Method の略称であり、貴重な資源を生み出す革新的手法と位置付けている。このペレット装入により電気炉での鉄源回収率はバラでの装入対比 20%の向上を達成している。

3. 連続鑄造技術の進歩

3. 1 連続鑄造生産性向上¹⁾

(1) 製鋼設備概要と CC 取鍋搬送フロー

知多工場の製鋼工場は70トン電気炉5基、精錬設備として取鍋精錬炉 (LF) 3基、RH 式真空脱ガス装置 (RH) 3基、ステンレス専用の精錬炉 (VCR) 1基、快削元素を添加する大気精錬設備 (CAS) 3基、大断面鑄造機 (PHC) 1基を保有している。また製鋼工場とは別の建屋である連鑄工場に、2基の CC (No.1:370 × 510 mm, 2ストランド湾曲型, No.2: φ 350 mm, 4ストランド, 垂直型) を保有しており、2005年までは、製鋼工場から連鑄工場へ溶鋼の搬送は、1ラインの溶鋼取鍋搬送線により行っていた。

No.1CC は自動車用構造用鋼を主体に、No.2CC は軸受鋼・ステンレス鋼を主体に鑄造しており、特に No.2CC については、特殊鋼の多品種・小ロットに対応するため、1つの取鍋を4ストランドで鑄造する4ストランドー1レードル操業と、異鋼種である2つの取鍋を2ストランドずつ同時に鑄造する2ストランドー2レードル操業が可能であり、2基の CC により合わせて最大3つの取鍋を同時に鑄造することが可能である。この2操業パター

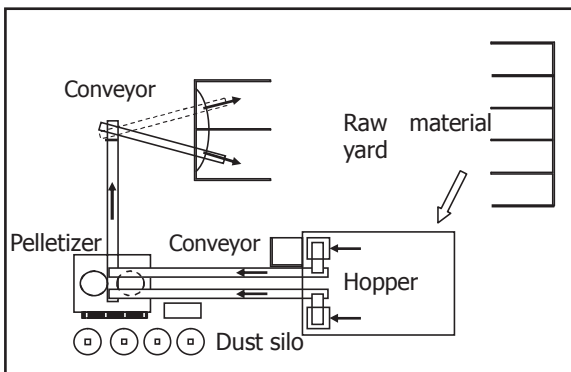


Fig.1. Layout of PRIME plant.

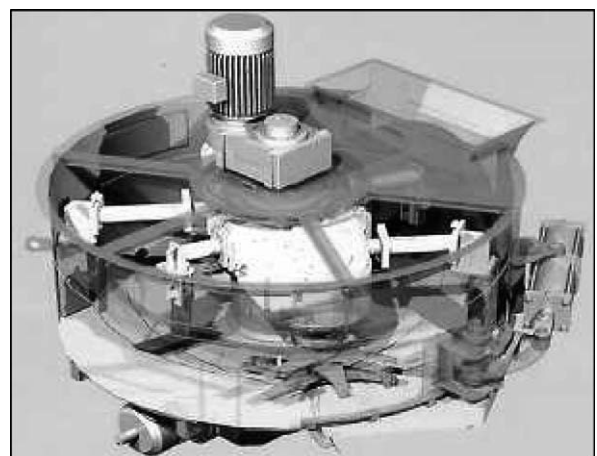


Fig.2. Pelletizer.

ン製鋼工場取鍋搬送フローを Fig.3 に示す。

(2) 生産性阻害要因

1992 年の No.2CC 導入以降 CC 合計の鋳造量は増加したものの No.1CC だけの鋳造量としては 1992 年以前に対して低下している。この要因は Fig.4 に示す製鋼工場と連铸工場間の溶鋼取鍋搬送時の以下 4 箇所の設備干渉によるものであり、この待ち時間のばらつきを考慮して LF 終了溶鋼温度を高く設定する必要があり、CC 鋳造速度を最大化できず生産性の低下をまねいていた。

- I 連铸工場内取鍋搬送クレーン待ち (溶鋼の入った取鍋を搬送できるクレーン 1 基のみ)
- II 製鋼工場内精錬ヤード取鍋搬送クレーン待ち (No.3LF,RH ラインと VCR ラインの干渉)
- III 製鋼工場-連铸工場間取鍋搬送線待ち
- IV 製鋼工場内造塊ヤード取鍋搬送クレーン待ち (CC 後の取鍋処理と No.2LF,RH ラインの干渉)

(3) 溶鋼取鍋搬送線と CC クレーンの増設による CC 生産性向上

製鋼工場と連铸工場間での取鍋搬送の干渉を解決すべく PC シミュレーションにより検証を行い、製鋼工場精錬ラインから連铸工場への溶鋼取鍋搬送線を新設し複線化すると効果が大きいという結果より、2005 年 10 月に CC クレーン増設、2006 年 1 月に溶鋼取鍋搬送線の増設 (複線化) を実施した。Fig.5 にそのレイアウト図を示す。

新溶鋼取鍋搬送線および CC クレーン増設により、No.1CC については取鍋搬送およびターレットへの取鍋上架を専用ラインおよび専用クレーンで行うこととなり、旧取鍋搬送線および精錬、CC クレーンの干渉緩和を実現できた。従来はそれらの物流干渉を想定して LF 精錬終了の溶鋼温度を上げて対応せざるを得なかったが、この設備増強による干渉の減少から、No.1CC ラインの溶鋼温度は LF 終了温度で 14℃、RH 終了温度で 10℃、CC 鋳造時 (取鍋残湯 25 トン時) で 4℃低減することができた。Fig.6 に設備増設前後の各工程の温度変化を示す。

これにより、CC 能率 18 トン/時間 (+13%) の向上を実現した。また CC 能率向上に伴い、LF 電力使用量の低減、タンディッシュ耐火物寿命の延長の効果も得られた。

3. 2 大断面铸造機 (PHC) の開発²⁾

(1) 開発背景

知多工場では 2004 年までは CC 2 基での生産比率は約 70% で、残り 30% は造塊 (インゴット) 法で製造し

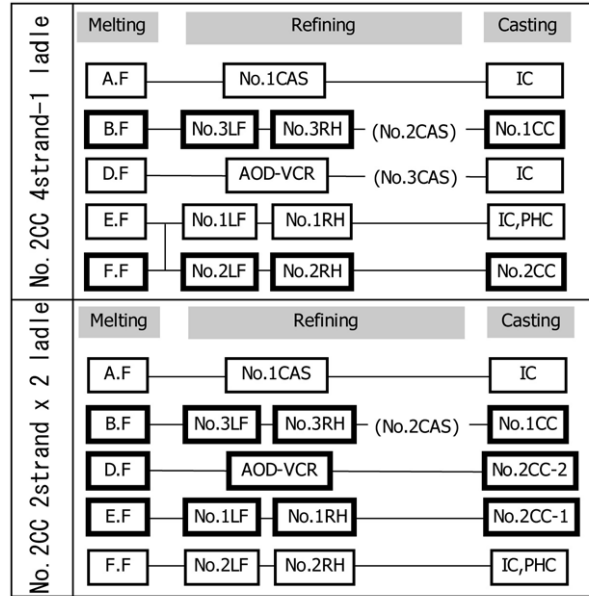


Fig.3. Steel making process in Chita plant.

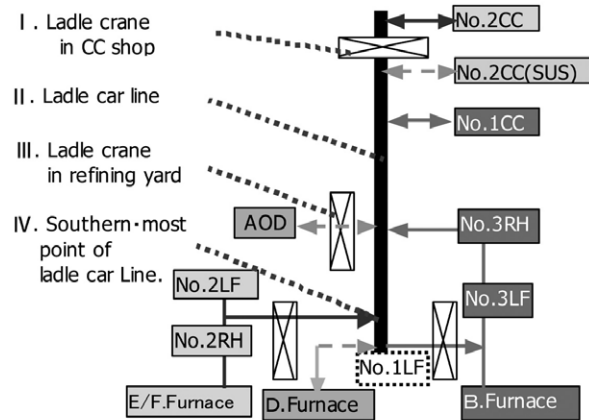


Fig.4. The factor of CC productivity decreasing in conventional plant.

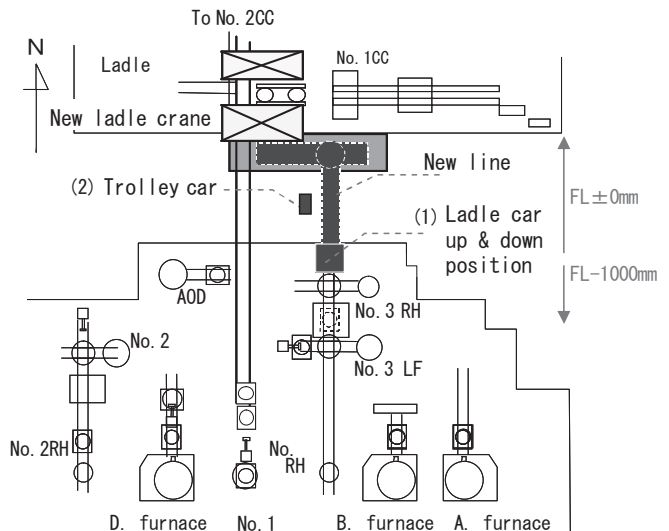


Fig.5. Improved layout of steel making plant.

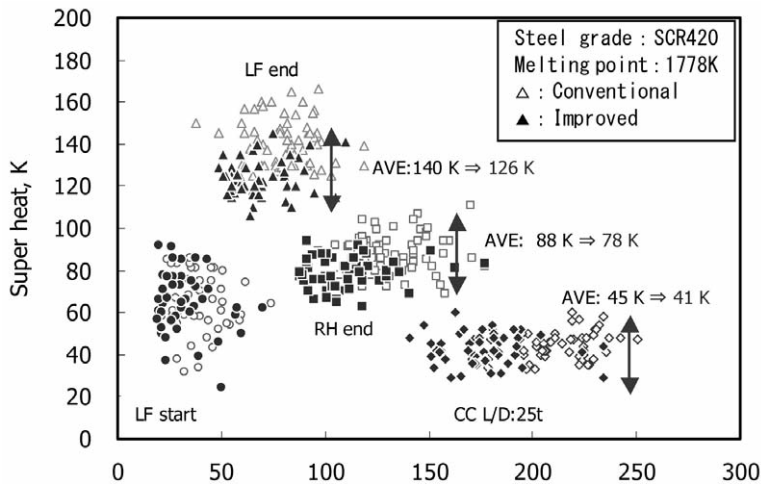


Fig.6. The effect of super heat at each process.

ていた。その理由として、第1は、鍛錬比の制約から保有するCC断面サイズでは製造できない大型もしくは広幅製品アイテムであり、これらは、CCの鋳型よりも約3倍大きな鋳型を用いてインゴット法で製造している。第2は、中心性状の品質確保が難しい高炭素鋼種などのアイテムである。第3は、小ロット材であり、CCで鋳造すると鋳造能率を下げ、歩留り優位性もなくなる。よってこれらの鋼種をCC化するために、大断面鋼塊化並びにその中心性状と小ロット材の歩留りロスを改善できる技術を保有した新鋳造機PHC (Promising Hybrid Caster)を開発し2004年7月より稼働を開始した。

(2)PHC 設備概要

PHCのコンセプトは以下の3点である。①大型製品製造用として鋳片断面積は既存インゴット同等に拡大した(既存CC断面对比3倍:650×850mm)。②大断面の鋳片内部品質を確保するため、モールドサイズを鋳造中に変え鋳片にテーパを付与する技術と鋳片中心部をプレスする鋳片ポンチ圧下技術を開発した。③最終凝固部の引け巣を防止し、歩留りを改善するため、鋳造終了後に鋳片トップ部を加熱する鋳片頭部加熱装置を搭載した。Fig.7に本設備の概要を示す。

(3)PHCにおける要素技術の考え方

大断面鋼塊化により、鋼塊内部に発生するザク欠陥や中心偏析、熱応力により発生する中心部のスパイダークラックや端面酸化は助長される。そこでPHCにおいては凝固界面角度を広角化するための極低速鋳造技術、鋳片テーパ付加技術、鋳片切断前に中心部のみを圧下し

物理的にザクを圧着できる鋳片ポンチ圧下技術の3つを中心欠陥改善技術として取り入れた。また、小ロット材の歩留り向上策として鋳造終了後も絶え間なく鋳片頭部の熱供給ができる鋳片頭部加熱技術(トップヒータ)を開発した。

(4)品質評価

①極低速鋳造・鋳片テーパ技術による品質評価

極低速鋳造(=0.1m/分)の効果によりPHC鋳片はバルジングが少なく、従来CC鋳片対比偏析度の改善、V偏析角度の広角化が成されている(Fig.8)。また、偏析が発生しやすい高炭素鋼において、極低速鋳造だけでなく鋳片テーパ付加操作を実施することで、ザクの発生や中心偏析は大幅に改善した(Fig.9)。これは鋳片テーパ付加により、極低速鋳造に加えて物理的に鋼塊形状に勾配が付与され、より一層凝固界面角度が広角化したためと推定される。

②鋳片ポンチ圧下技術による端面酸化防止効果

大断面鋳片は熱歪みが大きいいため、中心部に熱歪みによるスパイダークラックが発生し、ガス切断時や加熱炉での大気の吸引による端面酸化が懸念される。PHCではポンチ圧下技術適用により中心充填率が高位となり、中心品質においてもスパイダークラックを物理的に圧着することで端面酸化が防止できた。

③鋳片頭部加熱による引け巣低減効果

Fig.10にPHCで鋳造した最トップ鋳片の縦断マクロを示す。鋳片トップ部の頭部加熱により引け巣長さを約80%低減することができ、歩留り向上に寄与している。

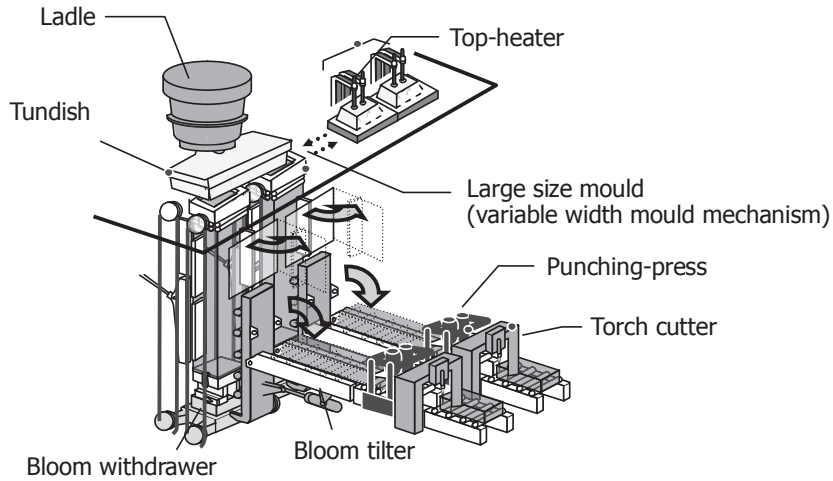


Fig.7. Schematic view of PHC.

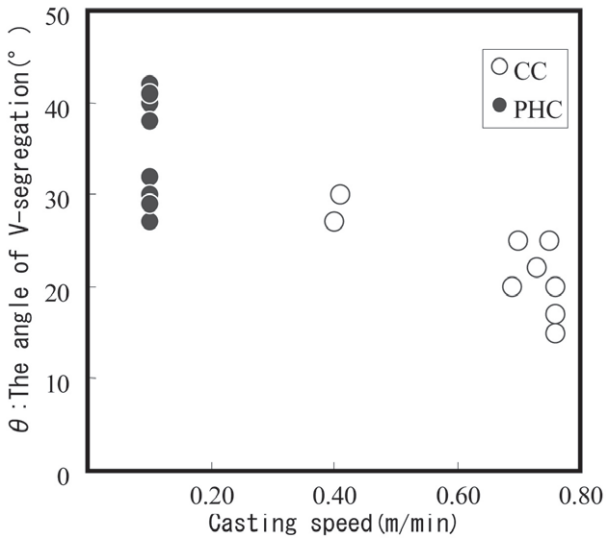


Fig.8. The comparison of the angle of V-segregation.
(Steel grade:0.2 % carbon steel, Casting speed:0.10 m/min)

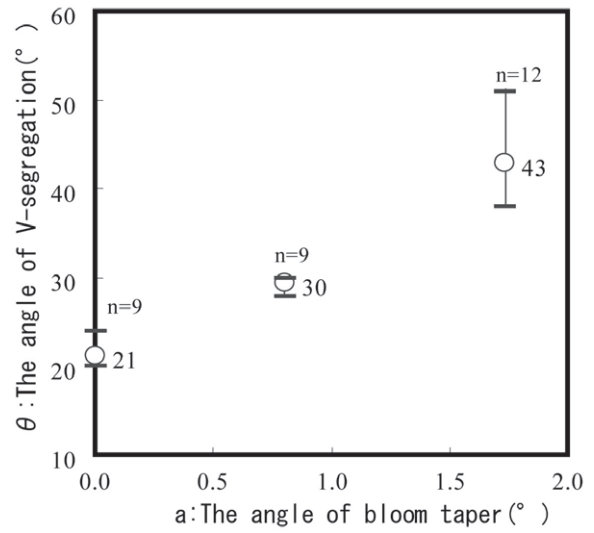


Fig.9. Relation between the angle of V-segregation and the angle of bloom taper.



(a) Without Top-heating



(b) With Top-heating

Fig.10. Effect of Top-heating (Steel grade:0.4 % carbon steel).

4. 環境・省エネルギー関連技術の進歩

4. 1 省エネルギーのための改善

日本鉄鋼連盟の自主行動計画に従い、当社は2010年に1990年対比10%のCO₂排出量削減を目標としている。製鋼部門の主要エネルギーは電力、炭材、燃料であり、CO₂削減を実現するためには、これらのエネルギーロスの極小化およびCO₂排出量の少ないエネルギーへの転換が重要なポイントであり、製鋼プロセスにおいても各種の改善を実施してきたので、以下にその代表例を示す。

(1) 溶鋼熱ロスの抑制

知多工場製鋼プロセスでは80tの溶鋼を電気炉出鋼後、精錬しCC 鋳込完了するまで約4時間を要し、その間の熱エネルギーロスは莫大である。この間の熱ロスを抑制すべく取鍋およびタンディッシュの断熱施工および鋳込時の鍋蓋適用を実施した。Fig.11 に取鍋断熱化内容を示すが、敷部および壁部（スラグライン+メタルライン）に断熱キャストブル、断熱ボードを施工した。Fig.12 に取鍋断熱化効果を示す。約100℃の鉄皮温度低減すなわち放散熱低減効果が見られ、溶鋼の温度降下を0.5℃/分から0.4℃/分に抑制することが可能となった。また、3.1項でも述べた溶鋼搬送線複線化による溶

鋼滞留時間の大幅な低減も抜熱抑制に大きな効果をもたらした。

(2) 炭材吹込みロスの低減

電気炉ではスクラップを電力と酸素を使用して溶解し、溶解末期に炭材吹込みにて溶解期に生成されたスラグ中の酸化鉄の還元を行っている。従来、炉壁から炭材の吹込みを実施していたが、集じんロス、スラグ上浮遊ロスなどが生じていたため、改善策として、操作室内で自動操作が可能なパイプによる溶鋼直接吹込み台車の開発、炭材の粒度アップを行い、反応効率を上げてロスを減らし、吹込み時の炭材原単位40%低減の効果をえた。

(3) 集じん電力ロスの低減

従来、ダスト発生量の多い電気炉では常にフル能力で集じんを行っていたが、改善策として直引集じんをインバータ化し、ダスト発生と関連のある酸素吹精速度や炭材吹込みタイミングと連動させることで適切な集じんコントロールが可能となった。また、軽量スクラップの集じんへの吸込み防止のため電気炉内のスクラップ高さ集じん能力を連動させることで歩留り向上に寄与した。また建屋集じんと同系統となっていた電気炉バグハウスの集じん系統を分離し単独化することにより、特定の電気炉溶解休止時にも個別の集じん停止が可能となり、無駄な電力を抑制することが可能となった。

(4) CO₂ 排出量の少ない電気炉操業法への転換

従来の電気炉操業は能率優先で単位時間当たりの投入エネルギーを上げるため、助燃エネルギーである炭材、

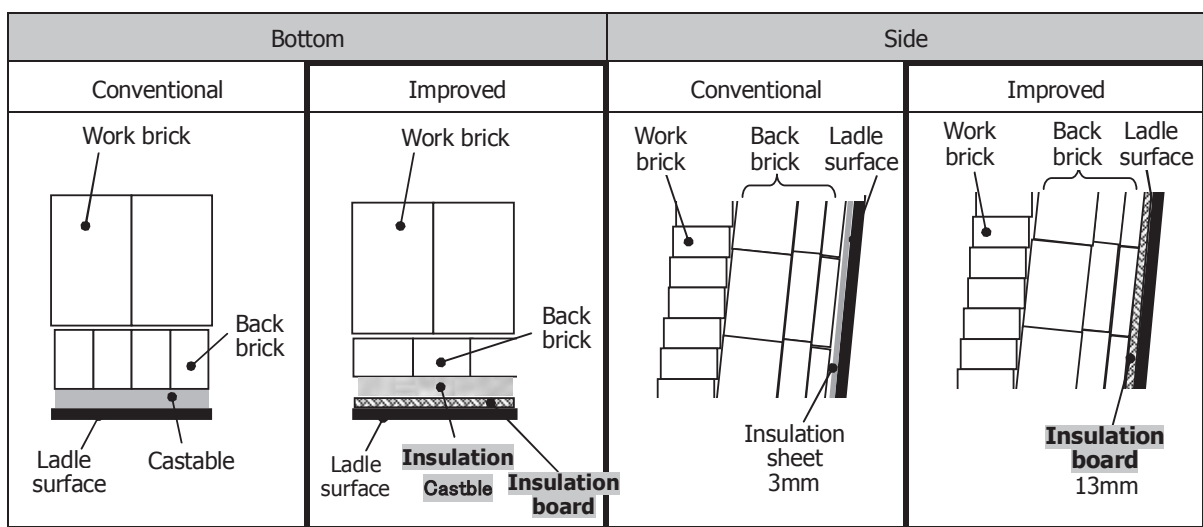


Fig.11. Outline of Insulation of Ladle.

バーナー（灯油），酸素を多量に使用していた．電気炉での主要エネルギーである電力とコークスを比較すると2倍以上もコークスのエネルギー単位当たりのCO₂発生量が高い．また同じ炭材の中でも無煙炭を使用することで，コークス対比約20%のCO₂削減効果がある．そこで炭材から電力へのエネルギーのシフトおよび，無煙炭化による改善を実施した．当初炭材から電力へのシフトは能率の悪化，歩留りの低下などの問題が懸念されたが，炭材と酸素バランスの最適コントロール，酸素吹精角度の変更による深吹き強攪拌化，出滓口などの開口部極小化などの改善を同時に行うことで従来同等の能率を保ちながら大幅なCO₂削減を達成した．また，高カーボンや廃プラスチックを含有したスクラップの使用により，粒状で投入している電気炉先入れ炭材と比べ搬送ロスや集じんロスが減少し，炭材使用量の低減も図っている．

知多工場製鋼部門は2006年より実施してきた上記を含む種々の改善によりCO₂排出原単位約7%低減の効果を得た．

4. 2 廃棄物溶融技術

特殊鋼製造プロセスで発生する副産物として，製鋼スラグ，スケール，ダスト，廃レンガ，スラッジなどがあるが，当社ではこれらの副産物のリサイクルのために，

さまざまな技術開発を行ってリサイクル率を向上させている．製鋼スラグについてはエージング処理技術開発により路盤材としての活用が早くから行われてきた．またスケール，ダスト，廃レンガについては電気炉にて溶融処理することも試行されてきたが，通常の生産操業との関係で処理量の制約もあるため，当社では溶解および精錬技術を発展させて独自のリサイクル専用設備によるプロセスを開発した．

DSM (Daido Special Method for Dust Slag Melting)^{3),4)}と呼ばれるプロセスは，ダストと還元スラグを粉体溶融酸素バーナーにより混合溶融させ，溶融したスラグ中に含まれる亜鉛酸化物を二次ダスト中に濃縮して回収し，亜鉛原料として外販し再利用して，残った酸化スラグも路盤材としてリサイクルする新技術である．Fig.13にDSMの構造を示す．炉の構造については，製鋼電気炉で培われた耐火物，炉壁の水冷化，底吹きガス攪拌の技術が活用されている．

このDSMの粉体溶融技術をさらに発展させて，DSR (Daido Special Recycle Process for Direct & Smelting Reduction) プロセスも開発しており，工場排水処理などで発生するスラッジの溶融無害化およびニッケルなどの有価元素の回収を行うリサイクルプロセスとして，DSMと並び，廃棄物のリサイクルに貢献している．

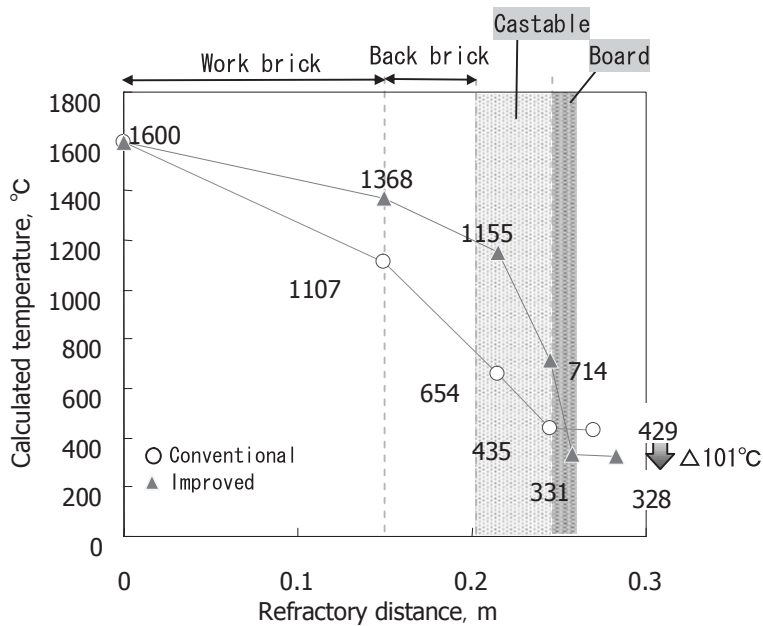


Fig.12. Change of ladle surface temperature.

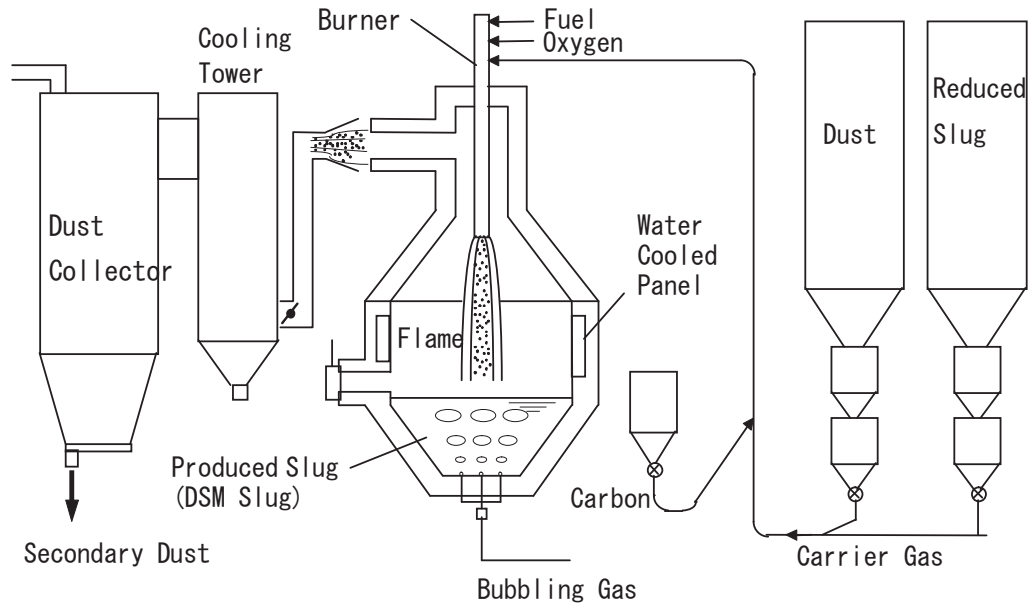


Fig.13. Schematic illustration of DSM.

5. 今後の展望

電気炉による製鋼法は、鉄資源リサイクルの根幹を担っているプロセスであり、今後、市中の鉄蓄積量の増加に伴い鉄スクラップの発生量増加が予測され、有効に活用すべきプロセスと考えられる。しかし、銅など通常の製鋼法では除去しにくい元素による汚染などの鉄スクラップの質の低下が懸念され、これらを使いこなす技術開発が要求される。また一方では今まで活用されていなかった鉄源の発掘や鉄スクラップ代替鉄源の開拓もしていき、鉄スクラップ市況の環境変化に強い体制づくりをしていかなければならない。

また、客先ニーズがますます多様化、高度化の方向に進んでいる中、いかに小ロット多品種を効率的に製造できるかが今後の課題であり、CC多連铸ができずに鋼塊により製造してきた小ロット対象も、CCやPHCにより効率的に生産する技術を開発していく必要がある。また、品質上連続铸造化が困難とされてきた鋼塊による製造対象のCC移行や更なるCC生産性向上（CC比率向上）も急務とされており、長年操業してきたCCではあるが、まだ残された課題は多々あり、新技術、新設備の導入により解決していかなければならない。

精錬という点では、自動車の高出力化、軽量化のための長寿命要求に対する素材の超清浄鋼のニーズが高まっており、従来、ESRやVARのような特殊溶解で製造したレベルの清浄度を炉外精錬のみで量産製造する技術が

要求されつつある。現状のLF-RHプロセスをさらに進化させた精錬プロセスの開発、介在物形態制御技術開発により、客先のニーズ、用途にあった特性を持つ素材を提供できるプロセスを確立することが重要である。

鉄鋼業界を取り巻く環境はますます厳しさを増しており、直近では鉄スクラップ、合金、燃料、諸資材の価格、鉄鋼需要がかつてない環境変化の大きい時代となっている。予測困難な急激な環境変化に取り残されることなく対応していくためには、時代のニーズにあった製造技術をタイムリーに開発していく力を持ち続けることが重要である。また将来的に労働人口の減少が懸念される中、熟練作業者のノウハウを反映したシステムを開発し、自動化、ロボット技術、新しい計測技術の導入などにより省力、作業環境の改善を促進していくことは、製鋼部門に限らず生産工場全体の共通課題であり、これらの技術革新が今後の発展の鍵と考える。

(文献)

- 1) 菰田頼忠, 山口智則, 岸幹根; 電気製鋼, 78 (2007), 41.
- 2) 岸幹根, 山口智則, 久村総一郎, 江口潤; 電気製鋼, 78 (2007), 49.
- 3) 小澤正俊, 早川静則, 岡本徹夫, 新貝元, 森健志; 電気製鋼, 70 (1999), 119.
- 4) 速石正和, 岡本徹夫, 高橋元; 電気製鋼, 72 (2001), 37.