

川崎製鉄のステンレス鋼製鋼プロセスにおける最近の進歩*

川崎製鉄技報
25 (1993) 2, 79-84

Recent Progress of Stainless Steelmaking Process at Kawasaki Steel



錦織 正規
Masanori Nishikoori
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室

西川 廣
Hiroshi Nishikawa
千葉製鉄所 製鋼部第
1 製鋼課長

反町 健一
Ken-ichi Sorimachi
鉄鋼研究所 鉄鋼プロ
セス研究部製鋼研究
室長(部長補)・工博

要旨

当社におけるステンレス鋼製鋼プロセスの最近の進歩について述べた。Cr 鉱石溶融還元プロセスの溶融還元炉では、ランス高さおよび送酸条件の最適化により、Cr 源としてのCr 鉱石配合量を増加することが可能となった。脱炭精錬においては、RH 脱ガスにトップランス酸素上吹き設備(KTB)を導入し、K-BOP における希釈脱炭とKTBによる真空中送酸脱炭を組み合わせた、複合脱炭プロセスを工程化することによって、より合理的なステンレス鋼の脱炭精錬が可能となった。また、30%Cr-2%Mo 鋼および20%Cr-5%Al 鋼といった特殊ステンレス鋼の製造技術の確立についても同時に述べた。

Synopsis:

A chromium ore smelting reduction process has been established for the production of stainless steel utilizing two K-BOPs (top and bottom blowing converters) at No. 1 Steelmaking Shop in Chiba Works. This process is characterized by saving energy with replacing electric power, increasing the flexibility of materials, and high productivity. At the smelting reduction furnace, the high-lance-height operation makes possible to enlarge a chromium ore consumption as a chromium source for stainless steel. Recently the KTB method, in which the oxygen gas is blown onto the steel melt in RH vacuum degassing vessel, has been developed and applied to the decarburization of stainless steel, resulting in a highly efficient stainless steelmaking process along with the above K-BOP process.

1 緒 言

当社では、1981年にステンレス鋼製鋼部門の千葉製鉄所への集約化を図り、第1製鋼工場85t LD 転炉の上底吹き転炉(K-BOP)への改造を中心とした設備更新を実施し¹⁾、鉄鋼一貫体制のもとで電気炉(MF)-K-BOPプロセスによるステンレス鋼の溶製が可能となった。以来ステンレス鋼製造技術開発の基本方針を、(1)生産性の向上、(2)安価かつ広範囲な原料の選択、(3)脱電力による省エネルギー、として種々の開発、品質向上を推進してきた。その結果、脱炭溶銑を用いて、K-BOPにおける安価な熱補償技術、高速吹錬技術等が開発され、合理的かつ高生産性を有するステンレス鋼溶製プロセスの礎を築いた^{2,3)}。これらの技術の蓄積をもとに、一層の生産性向上と省エネルギーを目的とし、鉄鋼一貫製鉄所に立地するという利点を最大限にいかして、Cr 鉱石の溶融還元プロセスを開発⁴⁾および操業条件の最適化を図るとともに、RH 脱ガスにトップランスによる酸素上吹き設備(KTB)を導入し⁵⁾、K-BOP-KTB法によるステンレス鋼の複合脱炭プロセスを確立した。

これらの技術開発を結集し、現在では、厳しくなるステンレス鋼の品質要求に応えるべく、各鋼種に応じて最適溶製プロセスを選択

し、合理的かつ、安定的な生産体制が構築されている。

ここでは、最近のステンレス鋼製造プロセスの概要について述べる。

2 千葉製鉄所におけるステンレス鋼製造プロセス

千葉製鉄所第1製鋼工場における、ステンレス鋼製造プロセスフローをFig. 1に、また、主要設備の設備仕様をTable 1に示す。

主要な工程である溶融還元プロセスは、ロータリーギルンにより約65~70%までCr 鉱石を予備還元したCr ペレットをCr 源とし、

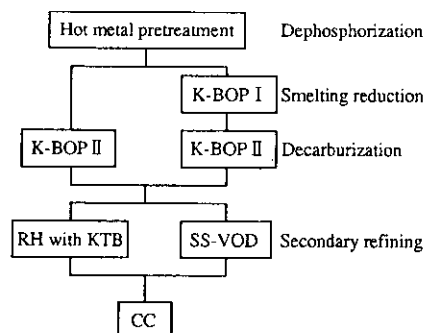


Fig. 1 Process for stainless steelmaking at Chiba Works

* 平成5年3月11日原稿受付

Table 1 Specifications on the main equipment of stainless steelmaking facilities at Chiba Works

Items	Specifications
Hot metal treatment	Torpedo injection (ATH type)
Flux	CaO based flux
Injection rate (max.)	500 kg/min
Oxygen flow rate (max.)	50 Nm ³ /min
Converter (K-BOP I)	Smelting reduction furnace
Capacity	85t (combined blowing)
Oxygen flow rate (max.)	300 Nm ³ /min (top lance) 100 Nm ³ /min (bottom tuyere)
Bottom gas	O ₂ , N ₂ , Ar
Waste gas treatment	OG type
Converter (K-BOP II)	Decarburization furnace
Capacity	85t (combined blowing)
Oxygen flow rate (max.)	230 Nm ³ /min (top lance) 100 Nm ³ /min (bottom tuyere)
Bottom gas	O ₂ , N ₂ , Ar
Waste gas treatment	OG type
Secondary refining	● RH degasser with KTB ● Strongly stirred VOD ● Ladle flux injection
Continuous casting	Curved mold slab caster
Maker	Sumitomo-Concast
Number of strand	1 strand
Machine length	19.5 m
Slab size	195 - 260 mm thickness 680 - 1700 mm wide

Table 2 Process application for stainless steel grades

Process	Stainless steel grades
K-BOP I - K-BOP II - KTB (K-BOP II - KTB)	Normal stainless steel SUS304(L), SUS316(L), SUS321, SUS410, SUS420, SUS430, SUS434, SUS436L SUH409, etc.
K-BOP I - K-BOP II - SS-VOD (K-BOP II - SS-VOD)	Ultra low carbon, nitrogen stainless steel SUS447J ₁ , SUS444, 20%Cr-5%Al steel, etc.

2基のK-BOPのうち1基を溶融還元炉、他の1基を脱炭炉としてステンレス鋼を溶製するプロセスである。溶融還元炉では、溶鉄予備処理によって脱炭された溶鉄を装入後、還元剤であり熱源であるコークスをCrペレットと同時に連続投入して還元精錬を行う。溶融還元炉から出鋼された含Cr粗溶鋼は、除渣後脱炭炉に装入し脱炭精錬を行う。2次精錬設備としては、トップランスによる酸素上吹き設備(KTB)を備えたRH脱ガスと、強攪拌型SS-VOD (strongly stirred VOD)があり、K-BOPとこれらの真空送酸脱炭設備での複合脱炭プロセスによりステンレス鋼を溶製している。

以上述べたような設備を有しているため、プロセスの選択肢も多く、製造する鋼種に応じて、もしくは原料事情に応じて、プロセスの使い分けが可能である。たとえばSUS304やSUS430の一般ス

テンレス鋼は、Cr鉱石溶融還元およびK-BOP-KTBによる複合脱炭プロセスを選択し、SUS447J₁やSUS444の高Cr極低炭低窒素高純度ステンレス鋼はK-BOP-SS-VODにより溶製するプロセスを選択している。Table 2には主なプロセスと対象鋼種についてまとめた。

3 溶融還元炉の操業

3.1 溶融還元プロセスの原料配合

溶融還元プロセスは、電気炉を用いないことによる生産性の高さと、原料選択の自由度の広さが特徴であり、安価なCr源を使用できること、ステンレススクラップや低級スクラップの多量配合も可能なこと等の優れた特徴を有している⁹⁾。Table 3にMF-K-BOPプロセスと、溶融還元炉でスクラップを溶解するスクラップ溶解併用型溶融還元プロセスの、それぞれにおける原料配合の一例を示す。溶融還元プロセスは、溶融還元炉で熱源としてコークスを用いてスクラップを溶解し、さらに合金鉄投入量が減少することにより生ずる余剰熱を利用して、脱炭炉でもスクラップを溶解できるので、ステンレススクラップはMF-K-BOPプロセスとほぼ同等の比率で利用が可能である。

Table 3 Material mix of stainless steelmaking process (kg/t)

	MF-K-BOP			SC+SR		
	MF	K-BOP	Total	K-BOP I	K-BOP II	Total
Normal scrap	351	—	351	—	—	—
Stainless scrap	333	—	333	240	125	365
Cr-pellet	—	—	—	260	—	260
Alloy	260	98	358	—	245	245
Hot metal	—	930	—	400 (51.5%) ^a	720 (66.0%) ^a	400 (34.5%) ^a

^a Hot ratio

3.2 溶融還元炉操業の最適化

溶融還元炉での吹錬パターンをFig. 2に、成分推移をFig. 3にそれぞれ示す。Crペレットと熱源である小塊コークスは、送酸速度に対し一定の比率で供給され、その比率を変化させることにより、精度の良い温度コントロールが可能である。

溶融還元吹錬は3期に大別される。ステンレススクラップを溶解しつつ鋼浴の温度を所定の温度まで昇熱するスクラップ溶解期、鋼浴温度を一定に保ちながらCrペレットの還元を行う溶融還元期、

		Scrap melting period	Smelting reduction period	Final reduction period
Condition of top charging system	Index of coke feeding rate	1.0	1.0	Addition of slag stabilizer ↓
	Index of Cr-pellet feeding rate	0	2.0	
	Slag control	CaO/SiO ₂ = 2.5 to 3.0		

Fig. 2 Blowing pattern of smelting reduction

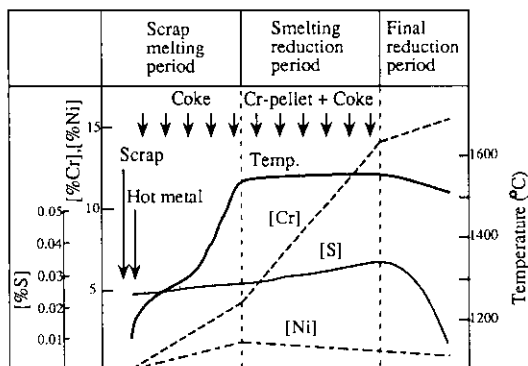


Fig. 3 Change in chemical composition and temperature of molten bath

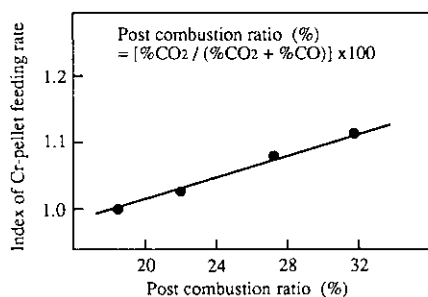


Fig. 4 Relationship between post combustion ratio and Cr-pellet feeding rate

スラグに残留した酸化クロムの回収と生成スラグの冷却時における粉化防止を目的としてスラグ改質を行う仕上げ還元期から成り立っており、最終的には16% [Cr]の粗溶鋼が得られる。

Crペレットの投入速度は、炉内の熱バランスにより決定されるため、2次燃焼の促進により炉内の発生熱量を増加させることが重要である⁹⁾。そこで上吹きランスからの送酸条件を変化させ、2次燃焼率と熱バランスするCrペレットの投入速度の関係を調査した。その結果をFig. 4に示す。2次燃焼率10%あたりCrペレットの投入速度は9.2%上昇することになる。2次燃焼率を促進させるためには、ランス高さを高く保つ操業（高ランスハイト操業）が有利であるが、一方で炉内発生熱量を増加させることは耐火物への悪影響も考えられる。このため現在では、耐火物自体の改善を積極的に行い、さらに耐火物に影響を及ぼさない範囲でランス高さを上昇させ操業を実施している。

4 K-BOP-KTBによる複合脱炭プロセスの採用

4.1 K-BOP-KTBによる複合脱炭プロセス概要

溶融還元プロセスにおいては、溶融還元炉から出鋼された高Cr粗溶鋼を、除滓後脱炭炉に装入し脱炭精錬を行う。脱炭炉においては脱炭精錬中に生じるCrの酸化ロスを低減し、還元用のFeSi合金鉄使用量の削減を図るため、底吹ガス流量と羽口本数の最適化⁷⁾、無倒出鋼比率の向上⁸⁾および高価なArガスを使用しない希釈吹錬方法の確立に努めてきた。

しかし、さらに精錬プロセスの合理化を図るため、脱炭炉における底吹希釈脱炭と、RH脱ガスにおいてトップランス酸素上吹き法（KTB法）を組合わせたK-BOP-KTBによる複合脱炭プロセスを

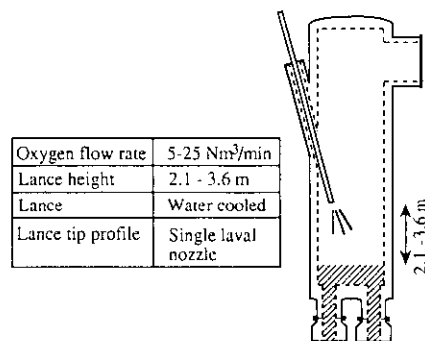


Fig. 5 Schematic illustration of KTB

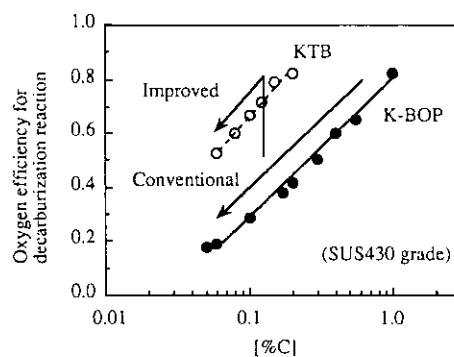


Fig. 6 Relationship between carbon content in molten steel and oxygen efficiency for decarburization reaction (SUS430 grade)

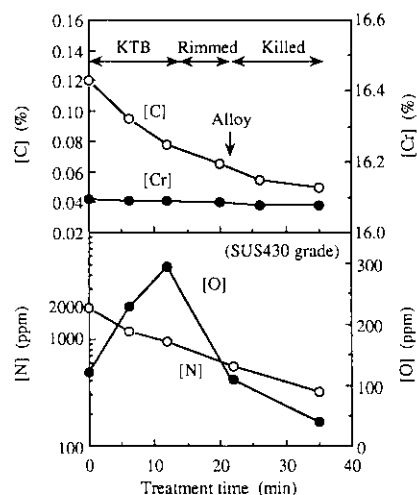


Fig. 7 Change in chemical composition during RH treatment (SUS430 grade)

導入した。千葉製鉄所 No.1 RH における KTB 設備の模式図および主仕様を Fig. 5 に示す。従来のプロセスでは、送酸脱炭は K-BOP にのみ依存していたため、Fig. 6 に示すように低炭素濃度域で脱炭酸素効率が悪く低下していたが、KTB による真空中送酸脱炭を組合わせた複合脱炭プロセスを導入し、脱炭精錬機能を分離したことにより、トータルの脱炭酸素効率は向上し合理的なステンレス鋼の脱炭が可能となった。

Fig. 7 には SUS 430 の KTB 処理中の成分挙動を示し、Fig. 8 には、K-BOP と KTB の低炭素濃度域までの脱炭時における酸素バランスの比較を示す。これらの結果から、K-BOP-KTB による複合

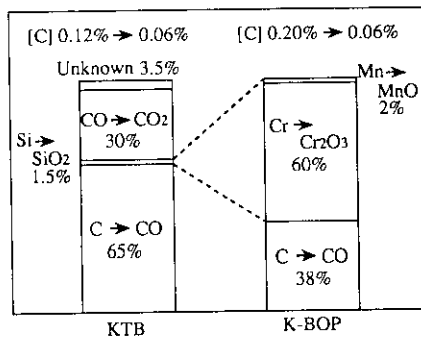


Fig. 8 Comparison of oxygen balance between KTB and K-BOP (SUS430 grade)

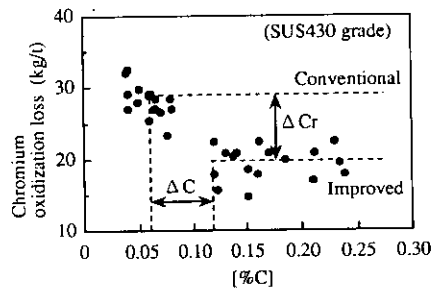


Fig. 9 Effect of tapping carbon content on chromium oxidation loss in K-BOP (SUS430 grade)

脱炭プロセスのKTB処理では、Crの酸化ロスをほとんど生ずることなく、製品目標成分値までの脱炭が可能となった。さらにこの複合脱炭プロセスの採用により、K-BOPにおいて中炭素濃度域での出鋼が可能となったため、Fig. 9に示すとおりK-BOPでのCr酸化ロスを低減した。

4.2 KTB 操業の最適化

SUS 304等の[N]スペックの緩い鋼種では、脱炭炉でArガスを使用しないN₂希釈脱炭を実施しているので、RH脱ガス処理開始時の鋼中[N]はP_{N2}=1気圧下のはほぼ飽和濃度に達している。Fig. 10にはSUS 304のRH脱ガス処理における[N]の推移を示すが、RH脱ガス処理初期のKTB送酸中に進行する脱炭反応とともに急激な脱窒反応が進行し、その結果槽内の溶鋼がフォーミングする現象が観察される。このような条件下での脱炭挙動を、KTBランスのランス高さおよび送酸速度を変更して調査を実施した。その結果をFig. 11に示すが、脱炭酸素効率は上吹き送酸条件をソフトブロー化することにより向上することがわかった。そこでこのような脱炭炉でN₂希釈脱炭を行う鋼種では、脱炭速度の低下しない範囲において送酸

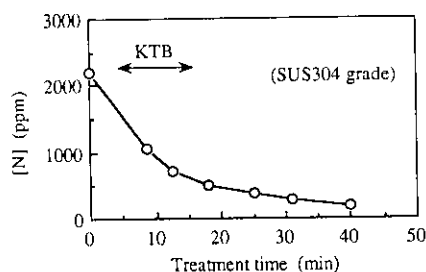


Fig. 10 Change in nitrogen content during RH treatment (SUS304 grade)

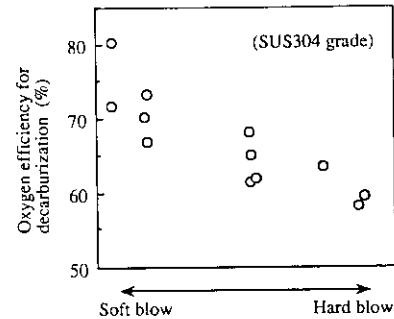


Fig. 11 Effect of blowing condition on oxygen efficiency for decarburization (SUS304 grade)

速度を低下し、またランス高さを上昇してソフトブロー指向の送酸脱炭を実施している。

4.3 KTBの有効利用

従来のRH脱ガスでは、溶鋼のスプラッシュによる槽内の地金付着が多く、槽内付着地金落下による成分不良や地金の成長による槽閉塞等のトラブルが発生していた。今回KTB設備を導入し上吹き送酸脱炭を開始したことにより、槽内での2次燃焼が促進され槽内地金付着は減少した。さらに槽内の付着地金の減少を図るべく、処理中送酸脱炭終了時にランス待機位置で送酸を行いランス孔付近の地金溶解および処理間に専用治具を使用して槽上部の地金溶解を試みたところ、槽内付着地金はほとんど皆無となった。その結果操業上の地金によるトラブルは皆無となりまた品質も飛躍的に向上した。

5 特殊ステンレス鋼製造技術の確立

5.1 K-BOP-SS-VODプロセスによる SUS 447 J₁ (30 Cr-2 Mo) の溶製

Table 4に示すような成分系のスーパーフェライト系ステンレス鋼 SUS 447 J₁ (30 Cr-2 Mo)は、極めて優れた耐食性を有しかつ応力腐食割れを生じないという特徴を持っているため、今後需要の拡大が著しい鋼種である。また高耐熱外装材料としても注目されはじめており、最近では関西新空港の屋根材として採用されている。

この鋼種は材質特性を確保するため、侵入型の不純物元素である[C]、[N]を極低値にする必要がある。高Cr鋼の脱炭脱窒挙動に関しては、従来より多くの報告^{9,10)}がなされており、当社では真空下で強撹拌が可能なSS-VODにより高純度化を達成している。

千葉製鉄所におけるこの鋼種の溶製プロセスは、当初MF-SS-VODプロセスであったが、Cr鉱石溶融還元プロセスの確立に伴うMFの停止以来、K-BOP-SS-VODプロセスに移行している。しかし、高[Cr]、[Mo]鋼であると同時に、極低[C]、[N]鋼であるため溶製が困難であり、溶製時間が非常に長く、生産性を低下させるという問題点を有していたが、近年ではそれが著しく改善されている。

Table 4 An example of typical chemical composition of 30%Cr-2%Mo steel (SUS447J₁) (%)

C	Cr	Mo	N
0.0020	30.0	2.0	0.0070

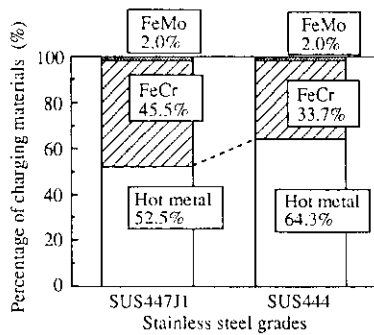


Fig. 12 Comparison of charging materials between SUS447J1 and SUS444

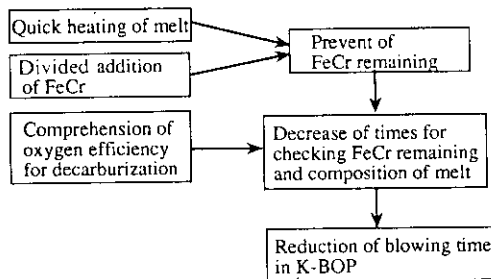


Fig. 13 Concept for reduction of blowing time in K-BOP

K-BOP においては、Fig. 12 に示すとおり脱炭溶解とほぼ同量の合金鉄を溶解しなければならず、その溶け残り防止および脱炭量の把握が吹錬時のポイントとなる。Fig. 13 に K-BOP 吹錬時間短縮の考え方を示す。FeCr の溶解に必要な銅溶の昇熱には、FeSi を用いているが、迅速に溶解を完了させるためには、銅溶の早期昇熱が必要であると考えられる。そこでそれぞれの合金鉄投入方法を検討し、FeSi は初期一括投入、FeCr は吹錬中分割投入とした。さらに送酸

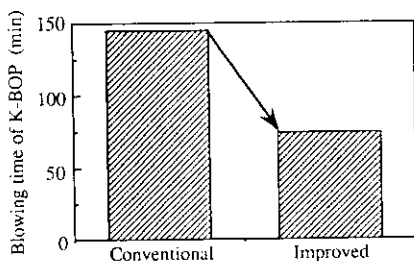


Fig. 14 Comparison of K-BOP blowing time between conventional and improved methods

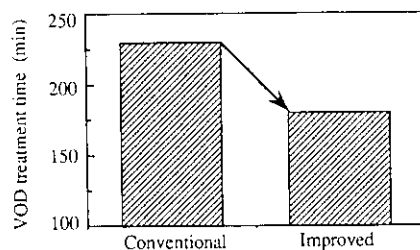


Fig. 15 Comparison of VOD treatment time between conventional and improved method

速度の増加および排ガス情報を利用した脱炭量の推定を実施しており、これらの改善の結果、K-BOP 吹錬時間は Fig. 14 に示すとおり、K-BOP→SS-VOD プロセスに移行した当初と比較して約 70 分短縮され、現在では 80 分以内の吹錬が可能となっている。また、K-BOP における吹錬技術の向上により、出鋼時の成分適中率が向上し、処理開始 [C] の低下が可能となった。これに加え SS-VOD 処理中での測温サンプリング方法を、従来のポンプタイプからフロータイプへ変更したことにより、サンプルの発送までの時間を短縮した結果、Fig. 15 に示すとおり、SS-VOD の処理時間は当初と比較し約 50 分の短縮が達成され 180 分以内の処理が安定して実現した。

以上のごとく、溶製段階での所要時間を大幅に短縮できたので、生産性を阻害することなく、大量に出鋼することが可能となった。

5.2 20%Cr-5%Al 鋼の連続鋳造技術の確立

20%Cr-5%Al 鋼は、自動車排ガス浄化用触媒コンバーターのメタルハニカム用素材として用いられており、従来のセラミックハニカムと比較して、エンジン効率向上する等の利点があるため、今後飛躍的に量的拡大が期待される鋼種である。

Table 5 にこの鋼種の成分系を示す。その特徴としては Al を 5% 含有していることのほかに、耐酸化性を向上させるために La を 0.08% 添加している。また、耐酸化性および材料のじん性の低下を防ぐため、極低炭素極低窒素鋼とし、さらに [C] と [N] を固定するために、Ti を 0.07% 添加している。

溶製プロセスは、極低炭素極低窒素鋼であるので K-BOP→SS-VOD プロセスを採用し、連続鋳造により鋳造することを試みた。

連続鋳造条件設定に必要な本鋼種の液相線温度、固相線温度、熱伝導率を測定した結果、通常のフェライト系ステンレス鋼とほぼ同等であることがわかった。また、1000°C における高温強度を測定した結果を Fig. 16 に示すが、高温強度は高炭素鋼と比較すると低いものの、これについても通常のフェライト系ステンレス鋼とほぼ同等であった。さらに、Fig. 17 には絞り値 (RA) の比較を示すが、RA は炭素鋼より大きく、60%以上となっており表面割れの恐れはないことから、ロール間のバルジに留意した頭部強冷型の 2 次冷却パターンを設定した。

また、モールドパウダー中に Al_2O_3 が富化し、パウダー物性が劣化するという問題も、パウダー組成を大幅に変更することによって解決した。Fig. 18 にパウダーの消費量を通常の SUS 430 と比較して

Table 5 An example of typical chemical composition of 20%Cr-5%Al steel (%)

Cr	Al	Ti	La
20.0	5.0	0.07	0.08

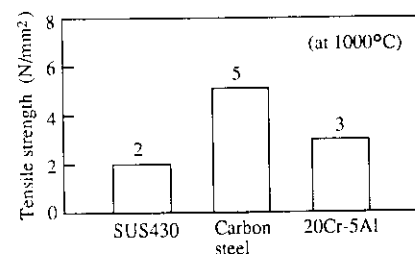


Fig. 16 Comparison of tensile strength at high temperature

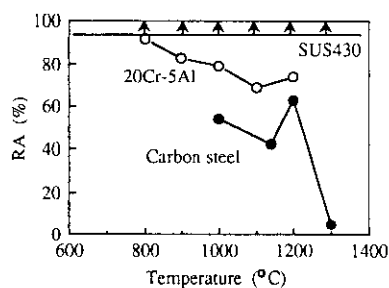


Fig. 17 Comparison of reduction of area at high temperature

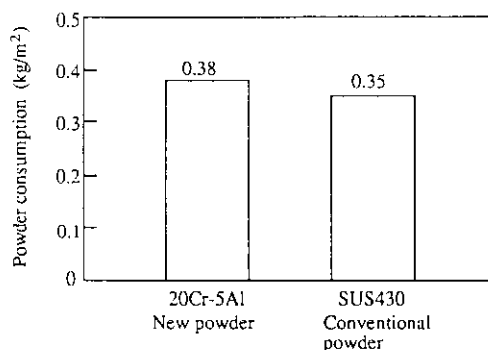


Fig. 18 Comparison of powder consumption between 20%Cr-5%Al steel and SUS430

示す。パウダーの消費量を通常の SUS 430 とほぼ同等であり、溶融層厚みも 15~30 mm 確保され、安定鑄造することができた。

この結果は、今後の要求量拡大に対応する量産体制の確立への礎となるものと考えている。

6 結 言

当社における近年のステンレス鋼製鋼プロセスをまとめると以下のとおりである。

(1) 溶融還元炉では、炉内の 2 次燃焼による発生熱量を増加さ

せ、Cr ペレットの投入速度を増加する操業条件を確立した。

(2) K-BOP-KTB による複合脱炭プロセスの導入により、合理的な脱炭精錬を確立した。

(3) 30%Cr-2%Mo 鋼や 20%Cr-5%Al 鋼の特殊ステンレス鋼の安定的製造技術を確立した。

これらの技術開発を積極的に推進してきた結果、鋼種に応じて製造プロセスの選択が可能となり、厳しくなるステンレス鋼の品質要求に応え、かつ高生産性による安定的なステンレス鋼の製造を実現している。

参 考 文 献

- 1) 大谷尚史, 柴田 勝, 朝穂隆一, 浜田俊二, 矢治源平, 加藤嘉英: 川崎製鉄技報, 15(1983)2, 21
- 2) 山田純夫, 田岡啓造, 朝穂隆一, 広瀬充郎, 今井卓雄, 小沢三千晴: 鉄と鋼, 69(1983)11, 1886
- 3) 田岡啓造, 野村 寛, 駒村宏一, 江本寛治, 数上文夫, 藤井徹也: 川崎製鉄技報, 17(1985)3, 202
- 4) 田岡啓造, 多田 睦, 山田純夫, 野村 寛, 大西正之, 馬田 一: 鉄と鋼, 76(1990)11, 1863
- 5) 多田 睦, 田岡啓造, 野村 寛, 田村 望, 原 義明: 材料とプロセス, 3(1990)1, 107
- 6) 多田 睦, 田岡啓造, 山田純夫, 田村 望, 加藤嘉英, 内田洋之: 材料とプロセス, 2(1989)4, 1192
- 7) 田岡啓造, 近藤英一, 野村 寛, 山田純夫: 材料とプロセス, 2(1989)1, 289
- 8) 近藤英一, 田岡啓造, 野村 寛, 山田純夫: 材料とプロセス, 2(1989)1, 290
- 9) 中西器二, 大井浩, 住田則夫, 鈴木宰: 鉄と鋼, 59(1973)12, 1523
- 10) 小口征男, 垣内博之, 鈴木宰, 江見俊彦, 村井高, 宮崎重紀, 岩岡昭二, 矢野修也: 川崎製鉄技報, 12(1980)4, 1