

真空脱ガスにおける 極低炭素鋼溶製技術の進歩

Recent Advances in Ultra-low Carbon Steel Refining Technology by Vacuum Degassing Processes

矢野正孝^{*(1)} 北村信也^{*(2)} 原島和海^{*(3)} 井本健夫^{*(4)}
Masataka YANO Shin-ya KITAMURA Kazuumi HARASHIMA Takeo INOMOTO

東和彦^{*(5)} 永浜洋^{*(6)}
Kazuhiko AZUMA Hiroshi NAGAHAMA

抄 録

1960年代前半に国内に導入された溶鋼の真空脱ガス技術はフラックス精錬や温度補償なども含めた多機能プロセスへと発展を遂げてきたが、近年では特に極低炭素鋼の溶製に重点を置いた技術開発が行われてきた。今回新たに、RH処理の全脱炭工程における反応サイト毎の脱炭速度を算出できる数学モデルを構築した。本モデルに基づいた計算値を実際のRH操業で得たデータと比較し、脱炭反応速度に及ぼす環流速度、排気速度、有効反応面積の影響を明かにした。そこで得た知見に基づき、予備真空設備の設置による排気速度の増大、ガス吹込み量の増加による反応界面積の拡大、トップバーナーや多機能バーナーの設置による地金付着防止の各技術を開発し、効率よく10ppm以下の極低炭素鋼成品を大量生産できる技術を確立した。

Abstract

The vacuum degassing process introduced into Japan in the 1960s have developed into multifunctional processes, including flux refining and temperature compensation. In recent years, technical development has been pushed forward with special emphasis on the refining of ultra-low carbon steel. Nippon Steel has developed a mathematical model which can calculate the decarburization rate for each reaction site in the decarburization process of RH treatment. Comparing the values calculated by this model with the data obtained from commercial RH operation, the effects of circulation rate, exhaust rate and effective reaction area on the decarburization rate were clarified. Based on the findings thus obtained, three techniques have been developed; a technique for increasing the exhaust rate by using a pre-vacuum equipment, a technique for enlarging the area of reaction interface by increasing the gas injection quantity, and a technique for preventing the adhesion of skull by a top burner or multifunctional burner. Using these techniques, a process for effective mass-production of ultra-low carbon steel with a carbon content below 10 ppm has been established.

1. 緒 言

1960年代初頭に導入された真空脱ガス設備(DH, RH)は、粗鋼生産量の伸びと高純度鋼の要求を背景に、大型化、汎用精錬設備化に目ざましい技術発展を遂げてきた。表1に新日本製鐵におけるその技術的發展経緯を示すが、容量的には当初70tが300t規模に、機能的には脱水素のみから脱炭、脱硫、脱酸、脱水素及び昇熱、成分調整機能も兼ね備えた総合精錬プロセスへと変身するに至っている。以下

にその發展経緯を概括する。

1.1 1960年～1970年代前半(真空精錬技術確立期)

1961年、1963年に本格操業を開始したDH, RHの国内第1号機は、当初大型鍛鋼品の脱水素処理を主目的に使用された。導入当時から、減圧を利用した脱炭、介在物除去等の精錬特性や、真空槽からの合金添加による成分狭幅制御技術について研究が行われ、今日の多機能精錬設備に至るための基盤が形成された。開発初期は、耐火物寿命が短く、頻繁な槽内のメンテナンスが必要であったために稼働率

*⁽¹⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 製鋼プロセス研究部 主幹研究員
 *⁽²⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 製鋼プロセス研究部 主任研究員
 *⁽³⁾ 技術開発本部 君津技術研究部 主任研究員

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 製鋼プロセス研究部 研究員
 *⁽⁵⁾ 名古屋製鐵所 製鋼部 部長代理
 *⁽⁶⁾ 技術開発本部 広畑技術研究部 主任研究員

表 1 新日本製鐵における主要な真空精錬技術開発

1960年 — 1970年代前半	真空精錬技術確立期	DH 法 70tDH の本格操業開始('61年 八幡) MgO-Cr ₂ O ₃ 煉瓦の採用('65年 八幡) ツインベッセル方式の採用('66年 光) 180t 規模へのスケールアップ('69年 八幡) 金属羽口によるガス吹込み('74年 八幡) RH 法 100tRH の本格操業('63年 広畑) ツインベッセル方式の採用('68年 名古屋) RH-OB によるステンレス精錬技術('72年 室蘭)
1970年代後半	設備規模拡大期	DH 法 大型(350t)DH の建設('79年 八幡) RH 法 RH-OB 浸漬羽口技術の開発('75年 室蘭) 大型 RH (350t) の建設('76年 大分) RH 軽処理技術の開発('77年 大分) Al 昇熱技術の確立('78年 名古屋) 浸漬管二段 Ar 吹込み('78年 広畑)
1980年 — 1980年代前半	精錬機能拡大期	RH 法 RH 全量処理操業('80年 大分) 槽内フラックス添加脱硫('80年 名古屋) 全自動処理技術の確立('84年 大分) 溶鋼環流量の増大('84年 名古屋) 槽内浸漬管の採用('84年 広畑) RH インジェクション法の開発('85年 大分) RH-PB 法の開発('86年 名古屋) その他 V-KIP 設備の開発('86年 君津)

は低く、適用鋼種も一部の高級鋼に限定されていたが、マグネシアクロマイト系煉瓦の採用や、ツインベッセル方式の普及等によって稼働率の向上が可能になり、適用鋼種も広がってくる。これら技術の展開を通して、溶鋼の環流が連続的である RH の方が、周期的な DH よりも冶金操作がやや容易であるとの理由で¹⁾、次第に RH が主要な脱ガス炉としての地位を占めるようになっていった。

1.2 1970年代後半（設備規模拡大期）

70年代後半になると、300t 規模の大型転炉の配置が整い、鋼の連続铸造（以後、連铸と記す）化も急速に進んだ。真空炉も転炉に適合した大容量のものが多数建設され、転炉、連铸間のマッチングタイムや温度の調整が二次精錬における大きな課題になってくる。RH 酸素吹込み法（以下 RH-OB と記す）は、ステンレス鋼の製造を目的として開発が進められ、1972年までには安定した操業技術が確立された。当初は上吹き酸素ランスを採用していたが、浸漬インジェクション方式の採用によって脱炭酸素効率が向上し、普通鋼の製造にも適用されるようになる。普通鋼製造における RH-OB 適用技術として開発された Al 昇熱法は、短時間で溶鋼加熱を可能にし、製鋼プロセスに大きな熱的裕度を与えた。一方、RH 軽処理技術は、RH-OB による全量処理を可能とし、転炉負荷の大幅軽減及び合金原単位の大幅低減を実現した。こうした二次精錬工程における技術革新が、この時期の転炉の大型化や連続铸造比率の伸びを支えてきたと言える。

1.3 1980年～80年代後半（精錬機能拡大期）

80年代に入ると、鋼の高純度化に対するニーズが高まり、70年代の末には16%であった国内転炉鋼の真空処理比率も5年後の1984年には50%を越え、本格的な高純度鋼の大量生産時代を迎える。1980年には、槽内フラックス添加法の確立によって RH による脱硫、脱酸が可能となり、更に、反応性が極めて高い粉末/メタル界面反応を

利用した RH インジェクションや RH-PB(Powder Blowing) 法が、更には、フラックス精錬専用真空設備である V-KIP が開発され、極低硫、低酸素鋼の安定製造技術が確立した。

以上の発展経緯から真空精錬は製鋼プロセスの最重要工程の一つとして位置づけられるに至っている。しかし、近年、自動車用鋼板や電磁鋼に代表される極低炭素鋼の需要が急増し、新日本製鐵における脱ガス処理量(1991年で約100万 t/月) のうち約3割が極低炭素鋼で占められるようになった。これに対応して、直近数年の技術開発は“真空炉における脱炭促進技術と、その反応・生産性を支える設備技術”に重点が置かれ、脱炭処理15分以内で[C] ≤ 10ppm の極低炭素鋼溶製技術を確立するに至っている。

従って本稿では、極低炭素鋼溶製技術に焦点を当て、脱炭反応モデル解析に基づいた操業、設備改善及び効果の総合検証結果について記述する。

2. 極低炭素鋼溶製技術の理論解明

2.1 脱炭反応モデルの構築

実プロセスの操業改善を進める場合、対象設備の反応律速因子を正しく理解し、最も効果的な手段を選択することが極めて重要である。これまで、脱炭機構を理解するためにいくつかの反応モデルが報告されてきた。例えば、住田ら²⁾は、反応速度に及ぼす環流の影響をモデル化し、RH 操業の改善指標を見いだした。又、Harashima ら³⁾は基礎試験によって極低炭素濃度領域の脱炭速度に及ぼす表面活性元素の影響を吸着モデルに基づいて定量化した。これらモデルの多くは、比較的簡単な式で構成されているため、容易に取り扱えるという点で有利である。しかし、実際の工程では処理中に真空度や炭素濃度が大きく変化し、律速因子の寄与率が逐次変化するために、排気開始時から極低炭素域までの反応挙動を単純モデルによって解析することは極めて困難である。今回新たに、RH の全脱炭処理を通じた反応速度の予測が可能なダイナミックモデルを構築し、反応速度の支配因子について検討を行った。

脱炭反応モデルの概要を図1に示す。その特徴を整理すると以下

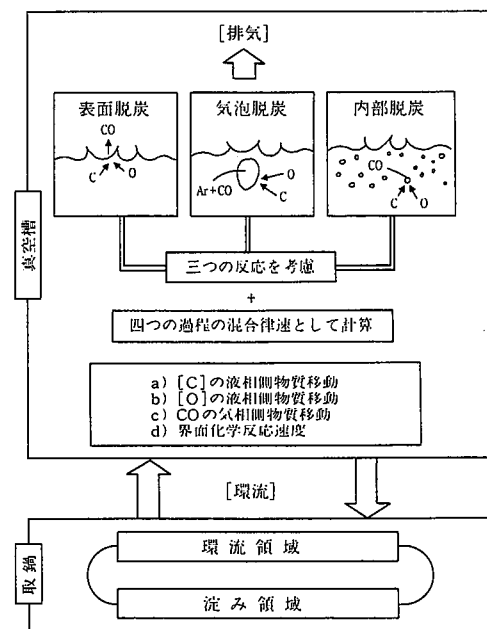


図 1 脱炭反応モデルの概要

のようになる。

(1)反応サイトとして、真空雰囲気中に暴露されている自由表面(表面脱炭)、吹き込まれたAr気泡の浮上中の表面(気泡脱炭)、ある値以上の過飽和圧を持つ溶鋼内部からのCOガスの発生(内部脱炭)の三つを考慮した。

(2)表面脱炭、気泡脱炭の反応を、(1)~(4)式で示される炭素の液相内物質移動、酸素の液相内物質移動、COの気相内物質移動、及び界面化学反応の四つの過程の混合律速モデルとした。

$$N_1 = ((A \cdot \rho / 100) / 12) \cdot k_c \cdot ([C]^b - [C]^i) \quad \dots\dots(1)$$

$$N_2 = ((A \cdot \rho / 100) / 16) \cdot k_o \cdot ([O]^b - [O]^i) \quad \dots\dots(2)$$

$$N_3 = -(A / (RT)) \cdot k_g \cdot (P_{CO}^b - P_{CO}^i) \quad \dots\dots(3)$$

$$N_4 = ((A \cdot \rho / 100) / 12) \cdot k_r \cdot ([C]^i \cdot [O]^i - P_{CO}^i / E) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 N_x は単位時間当たりの反応量(mol/s)、 $[C]$ 、 $[O]$ は炭素、酸素濃度(mass%)、 k_c 、 k_o は炭素と酸素の液相内物質移動係数(m/s)、 k_g はCOガスの気相内物質移動係数(m/s)、 k_r は化学反応速度定数(m/(%/s))で、ここではHarashimaの式³⁾を用いた。又、 ρ は溶鋼密度(kg/m³)、 E は平衡定数($[C] + [O] \rightarrow CO$)、 A は反応界面積(m²)、 P_{CO} はCO分圧(Pa)、 T は温度(K)を示し、上添えのbはバルク、iは界面を示す。

(3)内部脱炭は、Kuwabaraらのモデル⁴⁾を基本とし、各浴深位置で受ける静圧が見かけの P_{CO} より小さい場合には、ある内部脱炭終了条件(過飽和圧)までCOガスが瞬時に発生するとした。ここで、内部脱炭終了条件は見かけの P_{CO} が2,670Pa(約20Torr)以下になることと、炭素濃度が15ppm以下になることの両方を満足する場合と定めた⁵⁾。

(4)反応槽(真空槽)と取鍋内環流槽に加えて、取鍋内混合停滞槽を仮定し、各槽内は完全混合とし、槽間の溶鋼の入替えを考慮した。ここで、反応槽と環流槽間の入替え速度は既存の環流速度式⁴⁾を基本として定めた。又、混合停滞槽体積は全溶鋼量の10%とし、環流槽との入替え速度は、実測された均一混合時間に合うように規定した。

(5)真空度変化は、各装置毎に固有の真空度と排気能力の関係をプログラムし、発生ガス量に応じて真空度が規定されるようにした。

ここで、気泡脱炭については浸透説に基づき k_c 、 k_o を規定し、佐野ら⁶⁾による上昇気泡群での気泡径を与える式により、 A を規定した。又、気泡滞留時間等を計算する際の液体の上昇速度は環流速度と上昇管断面積とから計算した。一方、表面脱炭における k_c 、 k_o は、浸透説により計算される値の代表値である0.015m/sで一定とし、 A を規定するため、沢田ら⁷⁾の式による液体上昇流速 u (m/s)と、気泡上昇領域(気泡活性面)は他の自由表面よりも大きい有効反応表面積を持つという基礎実験結果⁷⁾に基づき、新たに、自由表面の有効反応表面積を表すパラメータ Π を(5)式で定義した。又、気泡活性面積は吹込み気泡の広がり角度を片側12°⁸⁾として幾何学的な断面積で算出した。

$$\Pi = u \times [(\pi d^2 / 4) + 6.5 \times S] \times (P_0 / P)^{2/3} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 π は円周率、 d は真空槽内径(m)、 S は気泡活性面積(m²)、 P_0 は基準圧(133Pa)、 P は真空槽内圧力(Pa)を示す。この Π の値と、各種RHの多様な操業条件での脱炭曲線への適合により得られた A の値との間の回帰式を求め、(6)式で A を規定した。

$$A = 0.65 \times \Pi \quad \dots\dots(6)$$

2.2 脱炭反応支配因子の解明

本モデルの実機RHへの適用例を図2に示すが、計算値は実績値と良い一致を示している。図中には各時点での反応サイト毎の脱炭量の比率も併記したが、脱炭初期は内部脱炭が主体に起こるのに対

し、末期になると表面脱炭が主体になることがわかる。本モデルの活用により、種々の要因が交絡する実機RHの脱炭挙動解析が可能であることから、表2に示す諸条件で操業されているRHへ適用し、要因の検討を行った。

ここで、脱炭速度定数は炭素濃度が150から50ppmまで低下する時間を t_1 (min: I期とする)、30から15ppmまで低下する時間を t_2 (min: II期とする)として、(7)、(8)式で求めた。

$$K_1 = \ln(150/50) / t_1 \quad \dots\dots(7)$$

$$K_2 = \ln(30/15) / t_2 \quad \dots\dots(8)$$

図3は本モデルに基づいて算定したI期における脱炭速度定数 K_1 (min⁻¹)と、環流比(環流量/溶鋼量: W_e/W)の関係を示す。脱炭速度は環流比の増大によって向上し、同一環流比で比較すると排気速度の大きなA-RHの方が高い値が得られている。従って、B-RHの排気速度を向上することによってI期の処理速度をA-RHに近づけることができ、又、A-RHの環流比をB-RHの最大環流量条件に

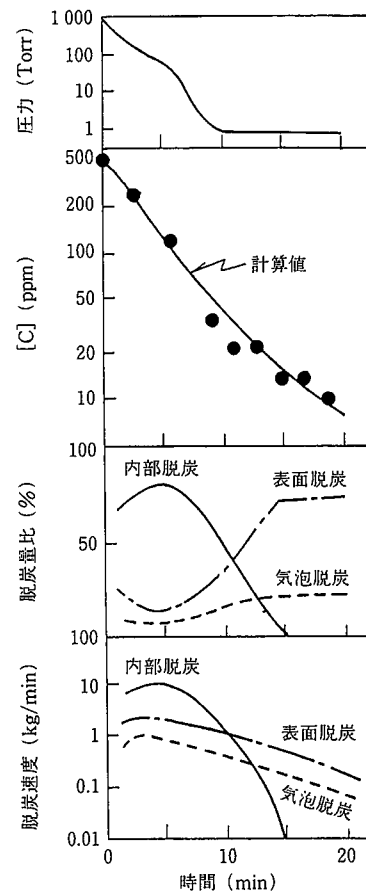


図2 脱炭計算モデルによる計算例と実績値の比較 (A-RH、環流ガス: 150Nm³/h、槽内攪拌ガス: 600Nm³/h)

表2 解析対象としたRHの設備、操業条件

	A-RH	B-RH
処理量(t)	260	340
浸漬管内径(mm)	730	600-750
環流ガス流量(Nm ³ /h)	150	150-240
槽内攪拌ガス流量(Nm ³ /h)	0-1000	0-390
排気能力 at300Torr(kg/t·h)	90	35
処理前鋼中[O](ppm)	500-650	250-400

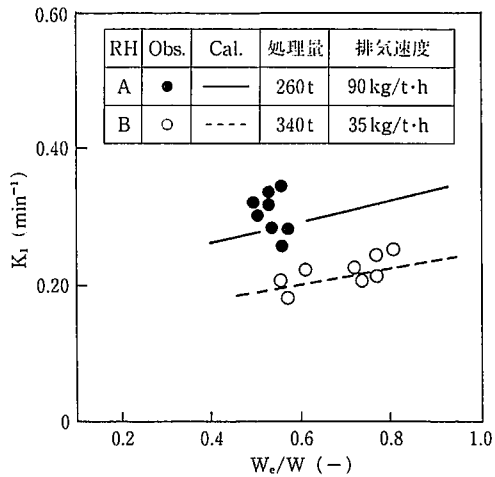


図3 脱炭速度(I期)におよぼす環流速度および排気速度の影響

近づけることによって更なる反応促進が期待できる。一方、図4はII期について、(5)、(6)式に基づき計算した、単位溶鋼量当りにおける表面反応の有効反応面積 A_s/W (m^2/t) の影響を示したものであるが、A、B両RHの実績データをほぼよく説明できる。図中●印はA-RHにおいて真空槽内に多量のガスを吹き込んだ場合であり、ガス吹込みによる有効反応表面積の拡大によってII期の脱炭速度が大きく向上していることが分かる。また、 $A_s/W > 0.6$ の強撹拌条件下では一部計算値よりも低い実績値が得られているが、これは、強撹拌による激しいスプラッシュが高炭素濃度の槽内付着地金を浸食して再溶融汚染を招いたためと考えられる。従って、RHで脱炭速度を増加させるためには次の点が重要になる。

脱炭I期

- (1)排気速度を高めて内部脱炭発生に必要な真空度を確保する。
- (2)環流速度を増加させて真空槽内の炭素濃度を鍋内の濃度に近づける。

脱炭II期

- (1)表面攪乱を激しく付与して表面反応の有効反応面積を増大させる。
- (2)付着地金や合金等からの炭素汚染を極力防止する。

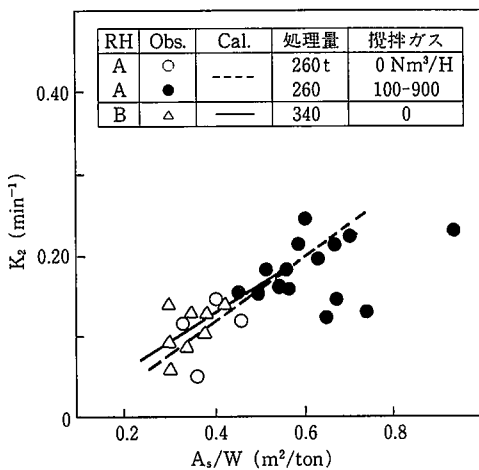


図4 脱炭速度(II期)に及ぼす有効反応面積の影響

3. 脱炭反応促進のためのRH設備・操業改善とその効果

新日本製鐵では従来知見及び上記解析結果に基づき、脱炭反応の促進を目的として種々の操業・設備改善を行ってきたが、主な改善技術を以下に示す。

3.1 高速排気技術

前述の通り、I期の脱炭速度を向上させるためには環流量の増大と排気速度のアップが重要である。名古屋製鐵所第二RHでは、1984年に環流量の増大を目的として浸漬管径の拡大と環流ガスの増大を行い、脱炭促進効果を得たが⁹⁾、I期の更なる反応促進を目的として1992年には予備真空設備を利用した高速排気技術を確立した。

予備真空設備の概要を図5に示す。処理を開始する前は、予備弁が閉の状態にあり予備弁下流側の排気系及び合金添加ホッパーの部分(310m³)が真空ポンプで約100Torrに保持されている。処理開始と同時に予備弁が開になり、脱ガス槽が急速に減圧される。本設備の利用によって環流が開始する真空度(約400Torr)には約4秒で到達でき、通常排気時よりも約30秒の短縮が可能になった。図6には各二点間の脱炭速度定数と炭素濃度の関係を示す。通常処理の場合、初期(高炭素域)は排気律速によって脱炭が停滞するが、予備真空技術の導入によって高炭素域の脱炭停滞が完全に解消できていることが分かる。

3.2 自由反応界面増大技術

II期の反応促進のためには、不活性ガスの吹込みによって有効反応面積を増加させることが重要である。真空槽内に複数箇所から大

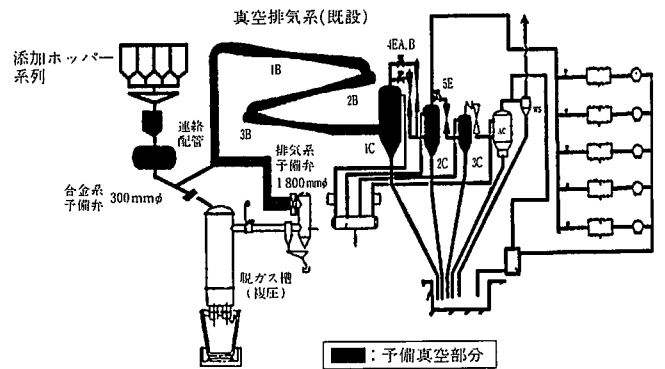


図5 予備真空設備の概略図

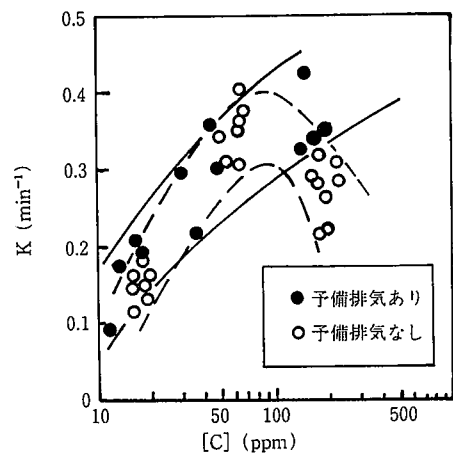


図6 鋼中炭素濃度と脱炭速度の関係

量のガスを吹き込むことができ、環流ガスを一方の浸漬管から吹き込む通常操作よりも、有効反応面積を大きく増大させることができる。

RH-OB 設備には酸素吹き込み羽口(以後 OB 羽口と記す)が設置されており、高炭素域の脱炭促進や Al 昇熱が可能である。更に、[C] < 100ppm の低炭素域の脱炭反応には通常酸素の物質移動は律速に関与しないため、OB 羽口からの酸素吹き込みの必要は無く、代わりに大量の Ar ガスを吹き込むことができる。図7にはII期の脱炭速度定数と全 Ar ガス流量の関係を示す。ガス流量を500Nm³/h から1000Nm³/h に増加させることによって速度定数はほぼ倍に向上しており、本技術によって、II期の脱炭速度を大きく向上できることが確認できた。

3.3 地金付着防止技術

真空槽への付着地金は、処理中の炭素汚染の原因になる他、地金除去作業の負荷を招くことから、地金の慢性的な付着を防止することは重要である。燃料バーナーは比較的容易に地金を溶流除去できる技術であり、ここでは、真空処理の合間に溶流除去できるトップバーナー技術と、処理中、非処理中を問わず地金付着防止と熱補償が可能な多機能バーナー技術について述べる。

3.3.1 トップバーナー技術

表3に名古屋製鐵所第二RHのトップバーナー設備^{10,11)}の主仕様を示す。当バーナーは、脱ガス槽上方より天蓋下5mまで装入でき、地金の溶解及び胴部槽から下部槽、浸漬管耐火物の予熱から乾燥にいたる全ての加熱作業が可能な設備である。このバーナーを用い、極限高稼働と極低炭素鋼溶製時の地金からの炭素汚染防止を目的に、常時高温予熱、地金溶流を行う地金レス操業を実施している。

図8に地金レス操業下での脱炭速度を地金残留条件下の場合と比較する。地金レス操業の場合、全処理中を通して脱炭速度が改善されており、特に低炭素域における速度低下が大きく改善されている。又、従来には脱炭終了後の合金添加処理中にも、地金起因と推定される[C]ピックアップが平均2ppm見られ、大きな問題となっていたが、地金レス操業ではそれが解消し、脱炭処理中、処理後の両面において地金起因の汚染が防止できる。

3.3.2 多機能バーナー技術

広畑製鐵所は薄板と電磁鋼という成分系の全く異なる鋼種を同一

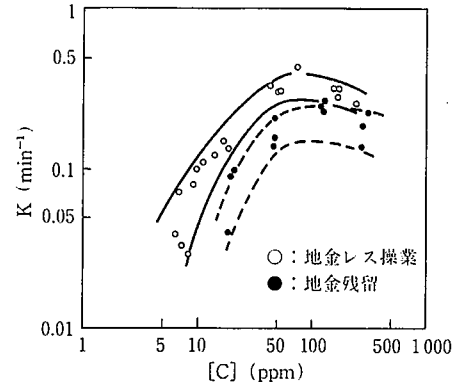


図8 脱炭速度に及ぼす槽内付着地金の影響

のRH設備で製造しているため、地金付着のない溶鋼温度補償技術の開発が課題であった。

そこで、単一のランスを用いて、1)溶鋼温度補償と常時槽内地金付着防止が可能なバーナー加熱機能と、2)酸素上吹き機能(脱炭促進, Al 昇熱)を有するRH多機能バーナーを考案し、実機設備を用いて試験を行い、良好な結果を得た。

表4に多機能バーナーの使用条件と具備している機能を示す。試験の結果、大気圧下、真空下を含め、800°C以上の着火温度、燃料の存在、酸素の存在の三条件が整えば安定して燃焼が可能であることが確認できた。

図9に非処理中、大気圧下での燃焼試験結果を示す。現状の電極加熱による耐火物着熱速度は40万 kcal/hであるが、LNG加熱によって得られた耐火物への着熱効率は約57~71%であり、LNG流量70 Nm³/hの条件では電極加熱と同等の、最大流量においては4倍の加熱速度が安価な燃料で実現できる。又、図10に真空処理中でのバーナー燃焼試験結果を示す。得られた溶鋼への着熱効率は約52%で、0.5~1.5°C/minの溶鋼温度補償が実現でき、燃焼ガスが真空度に与える影響も僅かで、排気装置の増強対策を必要としない範囲である。

表4 多機能バーナーの目的

	酸素+LNG	酸素吹き
減圧下(処理中)	溶鋼温度加熱 槽内耐火物加熱	脱炭促進 Al 昇熱
大気圧(非処理中)	槽内耐火物加熱	

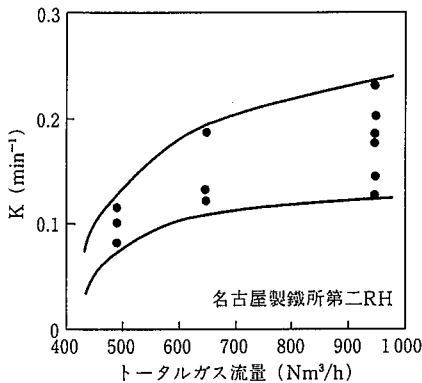


図7 全ガス流量と脱炭速度の関係

表3 トップバーナー設備の主仕様

予熱方式	上方装入型 純酸素燃焼 COG バーナー
燃焼容量	6.0×10 ⁶ kcal/h
燃料・流量	COG 1340Nm ³ /h

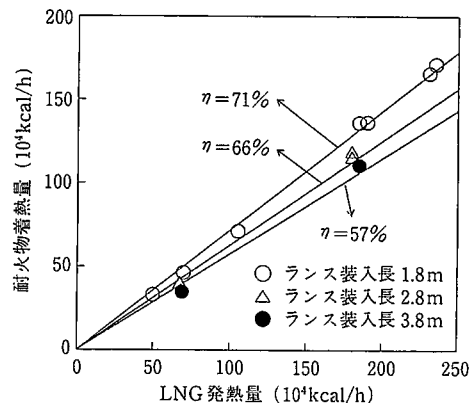


図9 LNG発熱量と耐火物着熱量の関係(非処理中)

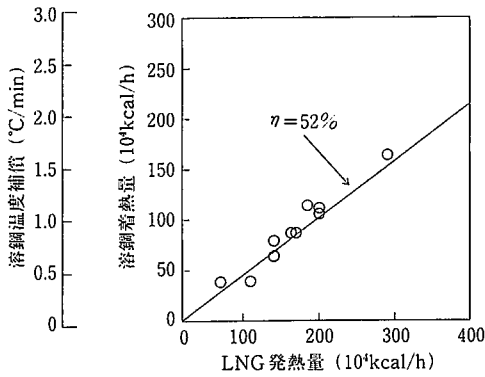


図 10 LNGバーナー加熱による溶鋼温度補償(処理中)

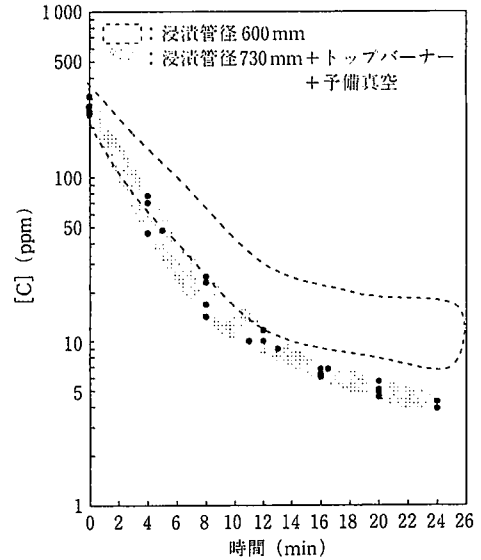


図 11 炭素濃度の経時変化

4. 極低炭素鋼の量産試験結果

上記考察に基づき、名古屋製鐵所第二RHで表5に示す設備増強と操業改善を行い、計9ヒートの極低炭素鋼溶製試験を行った。主要改善項目は、浸漬管径の拡大、予備排気の採用による排気速度の向上、環流ガス量の増大、OB羽口からの攪拌ガス吹込みに加えて、地金汚染の影響を回避するためにトップバーナーによる事前の完全溶流除去を行った。

図11に炭素濃度の経時変化を示す。処理中の平均炭素濃度は、処理12分10ppm、20分で5ppmにまで低減でき、従来法の実績よりも脱炭速度、到達値の両面で大幅な向上効果を得た。図12に脱炭、合金添加処理終了後のタンディッシュにおける格付炭素濃度を示す。脱炭後の[C]ピックアップ及びばらつきも非常に少なく、製品[C] ≤ 10ppmの多連鑄製造が可能となった。

5. 結 言

RH脱炭反応モデルによる脱炭反応支配要因の解明と、それに基づく操業改善の結果、10ppm以下の極低炭素鋼を大量生産できる見通しが得られた。今後は、極低炭素鋼の比率増加や鋼種の細分化が更に進むことが予想され、生産技術上の課題としては、メンテナンス時間を含めた全作業時間の短縮による量的生産裕度や、同一設備による多鋼種処理に対応できる精錬機能的裕度の確保に重点がシフトしてくるものと考えられる。例えば、本稿で触れたバーナー利用技術はこの両面から見ても今後利用範囲の拡大が期待できるもの一つに挙げられるが、更に、現在の処理工程の広がりを見ると、RHのみならず、転炉からタンディッシュまでを含めた範囲で機能拡大を進め、プロセス全体としての最適解が得られる二次精錬工程が展開されて行くべきであろう。

表 5 極低炭素鋼溶製試験条件

浸漬管内径	730mm
排気能力	2000kg/h(at 1 Torr) 予備真空排気設備使用
環流ガス流量	180Nm ³ /h
槽内攪拌ガス流量	340Nm ³ /h
地金除去	トップバーナー使用

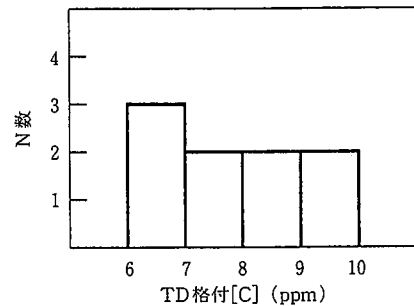


図 12 極低炭素鋼大量溶製試験結果

参照文献

- 1) 沖森麻佑巳：鉄と鋼. 79(1), 1(1993)
- 2) 住田則夫 ほか：川崎製鉄技報. 15(2), 152(1983)
- 3) Harashima, K. et al.: ISIJ International. 32(1), 111(1992)
- 4) Kuwabara, T. et al.: Trans. ISIJ. 28, 305(1988)
- 5) 堤直人 ほか：材料とプロセス. 5, 261(1992)
- 6) 佐野正道 ほか：鉄と鋼. 65, 1140(1979)
- 7) 沢田郁夫 ほか：鉄と鋼. 73, 669(1987)
- 8) 佐野正道 ほか：鉄と鋼. 68, 774(1982)
- 9) 大西保之 ほか：鉄と鋼. 70, S976(1984)
- 10) 高木信浩 ほか：材料とプロセス. 5, 1243(1992)
- 11) 國竹意智 ほか：材料とプロセス. 5, 1244(1992)