

© 1990 ISIJ

技術報告

高級鋼管および薄板における高純度鋼
製造技術辻野 良二*・小島 政道*²・遠藤 公一*³
沖森麻佑巳*⁴・小倉 順*⁵・中島 潤二*⁶Production Technology of High Purity Steel for High Class Line
Pipes and Cold SheetsRyoji TSUJINO, Masamichi KOJIMA, Koichi ENDO,
Mayumi OKIMORI, Jun OGURA and Junji NAKASHIMA

Synopsis :

Following purification technology for line pipes or cold sheets has been developed and put to practical use in some works of Nippon Steel Corporation.

(1) Synthetic refining system of hot metal pretreatment, top and bottom blowing converter and multi-functional secondary refining, namely ladle injection under reduced pressure (V-KIP), flux injection during RH treatment (RH-Injection, RH-PB) are successfully in operation. Consequently final product of $[P] \leq 50$ ppm, $[S] \leq 10$ ppm and $[H] \leq 1.5$ ppm can be stably produced.

(2) Ar injection into RH vacuum vessel or DH snorkel and vacuum vessel drastically improved decarburization rate of ultra low carbon level.

Technology of nitrogen removal during top and bottom blowing in converter and protection of molten steel from nitrogen adsorption between the end point of converter and casting have been operated. Consequently final product of $[C] \cong 10$ ppm, $[N] \cong 10$ ppm can be produced.

Key words : high purity steel; line pipe; cold sheet; dephosphorization; desulfurization; deoxidation; decarburization; nitrogen removal; hot metal pretreatment; top and bottom blowing converter; secondary refining; RH; DH.

1. 緒 言

これまで、鉄鋼各社では鋼の厳しい高純化要求に対応するため、溶銑予備処理技術、上底吹き転炉によるスラグレス脱炭技術の組合せによる分割精錬技術をほぼ確立し¹⁾、さらに各種二次精錬技術を発展させることにより、多品種の高級鋼の製造を可能にしてきた。

しかし近年、鋼の高級化、差別化商品製造のニーズはますます高まっており、さらに高純化かつ安定した製造が可能な技術の開発が必要となってきた。

たとえば、ラインパイプや海洋構造物に関しては、石油、天然ガス等のエネルギー資源の開発域が沖合、寒冷地となり、また油、ガスの品質そのものが劣悪化する等、使用条件がより過酷な環境下へ進んでいる。

すなわちこれら製品については高強度、低温靱性、耐水素誘起割れ等の複合特性を有することが必要であり、 $[P]$ 、 $[S]$ の高純化、介在物量の低減が要求されている²⁾。

また加工用冷延鋼板等の薄板に関しては、連続焼鈍法実施に代表される工程の合理化、およびエネルギー効率向上等の観点から更なる高延性、深絞り性、耐時効性の向上への対応が迫られており、 $[C]$ 、 $[N]$ の高純化が要求されている³⁾。

本研究では上記ラインパイプおよび薄板に的を絞り直近の新日本製鉄の各製鉄所で開発した $[P]$ 、 $[S]$ 、 $[C]$ 、 $[N]$ の高純化技術、介在物の低減技術の開発研究の結果について報告する。

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 9 日受付 (Received Mar. 9, 1990)

- * 新日本製鉄(株)製鋼研究センター 工博 (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)
- *² 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)
- *³ 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)
- *⁴ 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)
- *⁵ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)
- *⁶ 新日本製鉄(株)君津技術研究部 (Kimitsu R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

2. ラインパイプ製造プロセス

新日本製鉄君津製鉄所では、低りん、低硫の高純度鋼製造技術として、溶銑予備処理 (Optimizing the Refining Process, 以下 ORP と称する), 上底吹き転炉 (LD-Oxygen Blowing, 以下 LD-OB と称する) と減圧下取鍋粉体吹込み (Vacuum Kimitsu Injection Process, 以下 V-KIP と称する) の二次精錬設備を組み合わせた多段階精錬法を開発実機化してきた。製造のプロセスフローおよび製造上の特徴を Table 1 に示す。

特に ORP は高炉出銑溶銑の全量予備処理可能な脱りん, 脱硫の高純化量産プロセスとして初めて完成され⁴⁾, また V-KIP は脱水素と取鍋粉体吹込みによる脱硫, 非金属介在物低減の機能を集約した新しい高効率多機能設備であることが特徴である⁵⁾。

次に, 大分製鉄所の高純度鋼製造技術の工程フローおよび製造上の特徴を Table 2 に示す。溶銑予備処理, 転炉, 二次精錬の中で, 本技術の特徴の一つは溶銑予備処理 (Table 2 では ORP-M と称する) において, ターンテーブル上に置かれた取鍋にて脱珪スラグ排滓, 同時脱りん脱硫, 脱りんスラグ排滓を短時間に行えることにある⁶⁾。

さらに二次精錬工程では RH の機能と取鍋粉体吹込

みの機能を集約し (以下 RH インジェクション法と称する), 一つの設備で脱硫, 脱水素, 非金属介在物低減および成分調整が可能である⁷⁾。

一方, 名古屋製鉄所における高純度鋼の製造プロセスおよびその特徴を Table 3 に示す。溶銑予備処理 (Table 3 ではトーピードカー溶銑脱硫を TDS, 転炉での溶銑予備処理を LD-ORP と称する), 転炉, 二次精錬からなっており, 特に二次精錬は, 主として連続铸造向けには機能集約型の粉体吹込み可能な RH⁸⁾ (RH-Powder Blowing, 以下 RH-PB と称する) にて, また主として造塊向けには取鍋粉体吹込み (Table 中では IP と称する), LF, RH の各技術の組合せにより脱りん, 脱硫, 脱水素等をおのおのの最適条件下で処理することを基本にしている。

製品品質レベルに応じて, 処理フローを選択でき, ラインパイプの場合には, 溶銑予備処理, 転炉, (LF), RH の工程にて製造している。

2.1 極低りん化技術

極低りん化は, 基本的に溶銑予備処理技術と転炉吹錬技術の組合せによって可能である。すなわち溶銑予備処理技術の詳細は別報⁹⁾に譲るが, 溶銑予備処理での徹底した低りん化を行い, さらに転炉極低りん化吹錬技術としては転炉内付着残留スラグからのりん汚染の影響軽減

Table 1. Refining process for line pipe in Kimitsu Works.

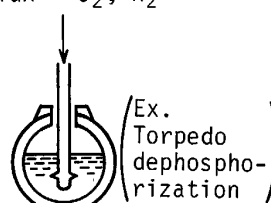
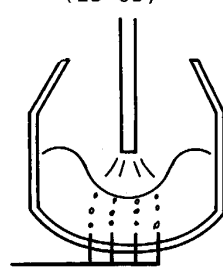
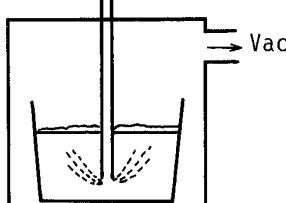
Process	Hot metal pretreatment	Combined blowing	Secondary refining
Equipment	(ORP) Flux + O ₂ , N ₂ 	(LD-OB) 	(V-KIP) 
Refining function	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desiliconization ◦ Dephosphorization ◦ Desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Decarburization ◦ Dephosphorization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desulfurization ◦ Degassing ◦ Decreasing of non-metallic inclusion ◦ Adjustment of component
Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Multi-step refining process ◦ Heat gain by oxygen 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency decarburization by strong stirring 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Multiple functional refining by strong stirring of powder injection under reduced pressure

Table 2. Refining process for line pipe in Oita Works.

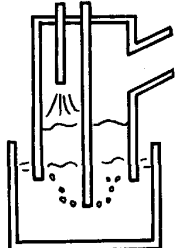
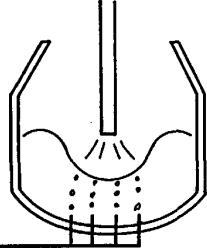
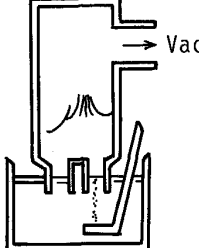
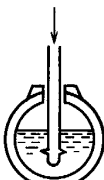

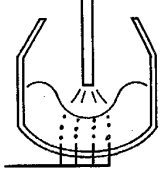
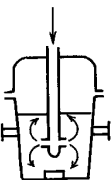
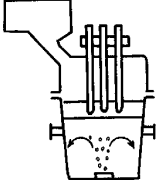
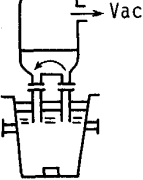
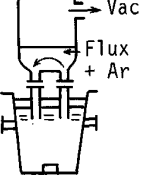
Process	Hot metal pretreatment	Combined blowing	Secondary refining
Equipment	(ORP-M) 	(LD-OB) 	(RH Injection) 
Refining function	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Dephosphorization ◦ Desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Decarburization ◦ Dephosphorization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desulfurization ◦ Decreasing of non-metallic inclusion ◦ Adjustment of component ◦ Degassing
Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency refining in ladle on turn table 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency decarburization by strong stirring 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Multiple functional refining of RH & powder injection

Table 3. Refining process for line pipe in Nagoya Works.

Process	Hot metal pretreatment		Combined blowing	Secondary refining (for IC)			Secondary refining (for CC)
	(TDS) Flux+N ₂	(LD-ORP) O ₂ N ₂ +Flux		(LD-OB)	(IP) Flux+Ar	(LF) Flux	
Equipment							
Refining function	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desiliconization ◦ Dephosphorization ◦ Desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Decarburization ◦ Dephosphorization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Floating of non-metallic inclusion ◦ Dephosphorization ◦ Desulfurization ◦ Heating 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Degassing ◦ Adjustment of component 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Desulfurization ◦ Degassing ◦ Decreasing of non-metallic inclusion ◦ Adjustment of component
Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency desulfurization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency refining of simultaneous desiliconization and dephosphorization 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ High efficiency decarburization by strong stirring 	Optimized refining by various process			<ul style="list-style-type: none"> ◦ Multiple functional refining of RH & powder injection

のための前ヒート低りん溶銑使用による炉洗い並びにソ
フトブロー吹錬がその骨子である。

2.2 極低硫, 低酸化技術

溶銑予備処理による脱硫技術は別報⁹⁾に譲り, ここで

は主流である二次精錬による極低硫化技術および低酸素化技術に関して、V-KIP 法、RH インジェクション法、RH-PB 法の各技術について述べる。

2.2.1 V-KIP 法

V-KIP 法の特徴は以下のように列記される¹⁰⁾。

(1) 減圧下のため雰囲気酸素分圧が低下するとともに取鍋内溶鋼の攪拌エネルギー密度は最大約 480 W/t になるためトップスラグの巻込みが起り、また酸化性のトップスラグが早期に還元無害化される。したがってトップスラグの組成を CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系での高サルファイドキャパシティー領域¹¹⁾に添加制御することにより大きな脱硫速度を得ることができる。処理中の [S] の推移を大気下粉体吹込み (以下 KIP と称する) の場合と比較して Fig. 1 に示す。

(2) 鋼浴中に懸濁する介在物量および Total [O] 量に関して V-KIP 処理中はスラグの巻込みのため増加するものの、処理後連続鋳造までの時間、静置することによって大幅に減少し、タンディッシュ中では介在物量、Total [O] 量とも大気下粉体吹込みの場合のレベルかそれ以下の清浄なレベルに達する。処理中の Total [O] の推移を KIP の場合とともに Fig. 2 に示す。

この理由として V-KIP 法では強攪拌によって介在物の凝集が促進され、処理後の上浮分離効果が大きいと考えられる。

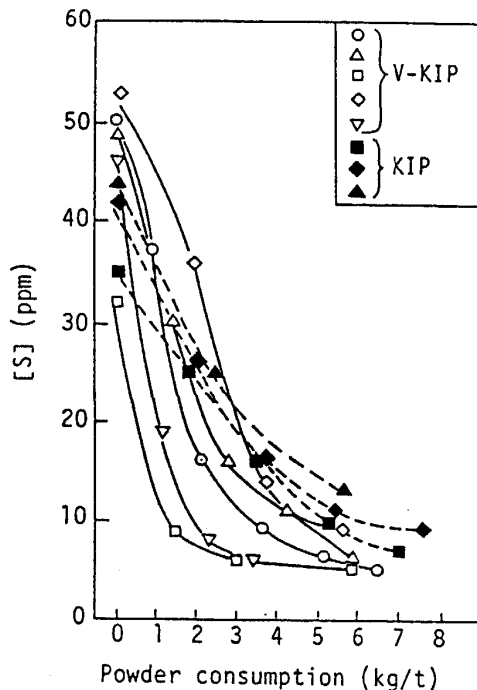


Fig. 1. Relationship between powder consumption and sulfur content of steel during treatment.

2.2.2 RH インジェクション法

RH インジェクション法は RH 上昇管下の取鍋溶鋼中の深い位置に浸漬させたランスノズルから真空槽内に侵入するように粉体を吹き込む方法であり、次の特徴を有する。

(1) 取鍋内の酸化性のトップスラグの攪拌が少なく、したがって脱硫反応への悪影響が少ない。

(2) 取鍋内底部近傍からの粉体吹込みのため粉体の滞留時間が比較的長く、また取鍋内底部近傍及び真空槽内の攪拌が促進できる。

(1) に関しては、Fig. 3 に示すように吹込み粉体の組成の影響について、RH インジェクション法の方が、吹込み粉体のトップスラグとの攪拌混合が促進されると考えられる取鍋粉体吹込み法より脱硫効率に及ぼす影響が顕著に現れる。したがって高サルファイドキャパシティーを有する CaO-40%CaF₂ の組成の粉体を有効に用いることができる。粉体吹込み中に RH 下降管直下

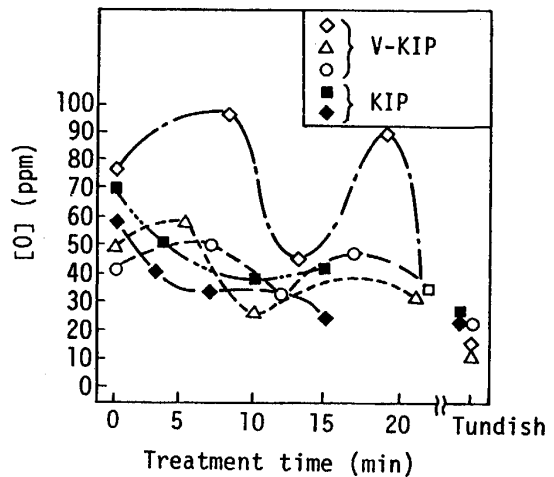


Fig. 2. Change in oxygen content of steel during treatment.

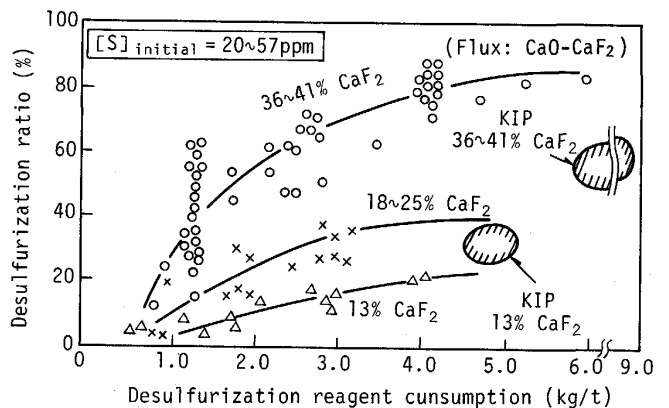


Fig. 3. Effect of desulfurization reagent composition on desulfurization ratio in RH injection and KIP.

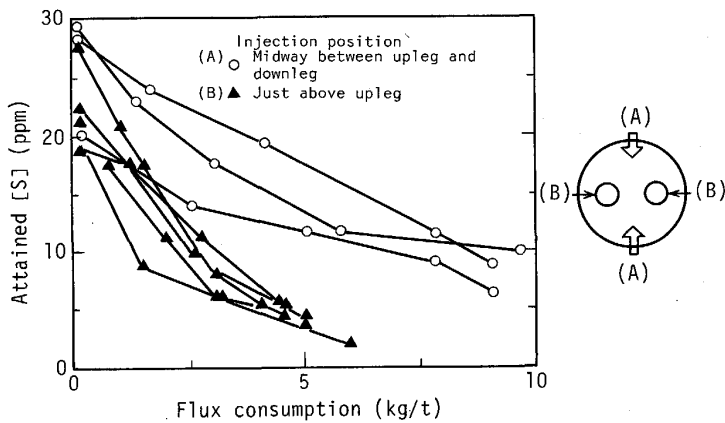


Fig. 4. Relationship between flux consumption and final sulfur content.

で採取し、EPMA 定量分析を行った結果、粉体中の (S) は 1.5~2.4% であり、粉体と溶鋼の (S)/[S] は 600~1000 の高い値となっている。

その結果、取鍋トップスラグの除去、改質なしで、少量の粉体原単位で高脱硫効率が得られる。

また RH インジェクション法の介在物低減機能の特徴は、CaO-40%CaF₂ のアルミナクラスターの形態制御、低融点化によって浮上分離を促進することにある。

2.2.3 RH-PB 法

RH-PB 法は真空槽内壁に設置した本来、酸素吹込み用である RH-OB ノズルを利用して脱硫剤を吹き込む方法である。本法における特徴は次の点にある。

(1)RH インジェクション法と同様、取鍋内の酸化性のトップスラグの攪拌が少なく、したがって脱硫反応への影響が少ない。

(2)真空槽内溶鋼に直接粉体を吹き込むことにより、真空槽内溶鋼が著しく攪拌されるため粉体と溶鋼の接触が促進され、反応効率が向上する。

(2)に関して、真空槽内溶鋼への粉体の吹き込む位置が脱硫効りに大きく影響する。すなわち Fig. 4 に示すように、図中 (B) の場合の RH 浸漬管直上の比較的強攪拌域に脱硫剤を吹き込むことにより脱硫効率は著しく向上することがわかる。

なお上記 V-KIP 法、RH インジェクション法、RH-PB 法いずれの方法も転炉流出スラグを排滓しない低コスト高效率脱硫法である点で共通している。以上いずれの方法にても [P] ≤ 50 ppm, [S] ≤ 10 ppm, [H] ≤ 1.5 ppm の高純度鋼の量産が可能である。

一例として、大分製鉄所の上記工程で溶製されたラインパイプ成品の高炉出鉄から成品までの [P], [S] の推移を Fig. 5 に示す。

なお高純化技術の流れとしては、これまで種々の専門機能を有する設備を開発し、設備が多様化したがる、近年、

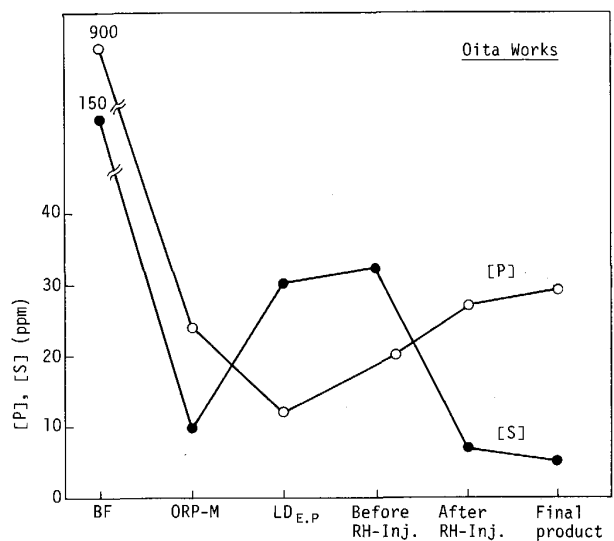


Fig. 5. Change in [P], [S] from BF to final product.

高コスト、物流の複雑化等の問題から機能の集約化の方向にむかっている。

しかし、今後さらに高純化を迫及する場合、各設備の高効率化はもちろん、現在進んでいる機能集約と専門機能分化の選択が重要となつてこよう。

3. 加工用冷延薄板製造プロセス

新日本製鉄の各製鉄所では経済的あるいは技術的理由から転炉溶製における吹止め [C] を約 300~400 ppm とし、[C] 約 300~400 ppm から [C] 約 10 ppm までの極低炭素化は RH または DH の二次精錬の減圧処理によって行っている。さらに極低炭素鋼製造においては二次精錬後および鑄造における [C] 汚染防止が重要であり、汚染源の除去を徹底している。特に鑄造時、カーボンレスパウダー¹²⁾ を使用していることが特徴である。

従来より、RH または DH の各設備とも脱炭処理効率

向上のため以下の対策を採ってきた。

①環流ガス量増加¹³⁾ または浸漬管断面積の拡大¹⁴⁾ による RH 環流速度の増大, また真空槽の高速昇降および真空槽のプロフィール改善に伴う真空槽内溶鋼吸上げ量増加による DH 循環量増大¹⁵⁾¹⁶⁾

②高速真空排気¹⁷⁾

③特に大分製鉄所では前記 RH インジェクション法により, 浸漬管からの Ar ガス吹込みに加え, また浸漬管からの Ar ガス吹込みに替え, 取鍋内の深い浸漬位置でのランスノズルから Ar ガスを吹き込むことによって環流速度増加を図っている。

以上の対策に加え, 近年, 特に問題となってきた [C] 30 ppm 以下の極低炭素領域での脱炭処理効率向上のため

④RH での真空槽内 Ar ガス吹込み, また DH での吸上げ管または真空槽槽底からの Ar ガス吹込み

⑤槽内地金除去装置¹⁸⁾

等の技術が開発された。

3・1 極低炭素化技術

これまで脱炭反応の機構に関しては数多くの研究¹⁹⁾ があるが [C] が 100 ppm 以下の低炭素領域, さらには前述のように特に実機操業において問題である [C] が 30 ppm 以下の極低炭素領域での研究は非常に少ない²⁰⁾。

実操業上, 極低炭素領域での脱炭速度を低下させる原因としては詳細の理由は明らかではないが, 定性的には

① CO ガス発生量の減少, すなわち攪拌力の減少による反応界面積の減少または物質移動量の減少

② [C], [O] と平衡する CO 気泡圧 (P_{CO}) の低下による気泡発生領域 ((1)式における h) の減少

③ (1), (2)式における CO 気泡生成に必要な過飽和圧 (ΔP_{CO}) の存在

④ 取鍋内溶鋼の澱みの影響²¹⁾

等が推定されると同時に

⑤ 高炭素溶鋼の真空槽内付着地金による汚染の影響も明らかに見られ²²⁾, これら複数の要因が影響しあっていると推定される。

$$P_{CO} = P_0 + \rho gh + 4\sigma/d + \Delta P_{CO} \dots\dots\dots(1)$$

$$P_{CO} = K[C][O] \dots\dots\dots(2)$$

3・1・1 RH における真空槽内 Ar 吹込み技術

上記①~③の対策として新日本製鉄名古屋, 君津両製鉄所の実機 RH において真空槽内 Ar 吹込みの技術を実機化した。真空槽内 Ar ガス吹込みノズルとしては既設の RH-OB ノズルを利用し, 従来より吹き込んでいたノズル冷却保護用の Ar ガスに加え, 多量の Ar ガスを吹き込んだ。

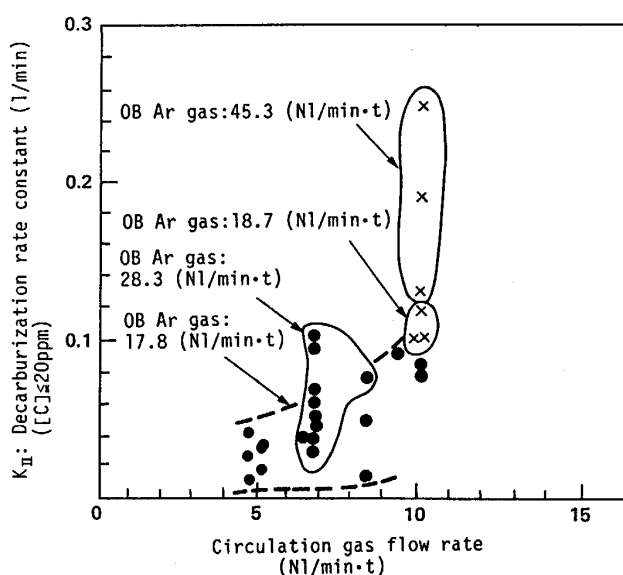


Fig. 6. Effect of Ar injection into vacuum chamber on decarburization rate constant ($[C] \leq 20$ ppm).

[C] が 20 ppm 以上では脱炭促進効果は見られないが, $[C] \leq 20$ ppm の極低炭素領域においては Fig. 6 に示すように脱炭速度が飛躍的に向上した。

なお脱炭反応の物質移動容量係数は(3)式において $[C]^* = 0$ とおいて求めた。

$$Ak/V = 1/t \ln \left(\frac{[C]_i - [C]^*}{[C]_i - [C]^*} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ここで $[C] \leq 20$ ppm の領域において $[C]_i \approx 20$ ppm, $[C]_i < 20$ ppm とした。

3・1・2 DH における Ar 吹込み技術

新日本製鉄八幡製鉄所において, DH の吸上げ管または真空槽の槽底から Ar ガスを吹き込んだ場合の吹込み位置の概略図および効果をおのおの Fig. 7, Fig. 8 に示す。

Fig. 8 から明らかなように DH の吸上げ管または真空槽の槽底から Ar ガスを吹き込んだ場合, 脱炭速度が向上している。特に極低炭素領域に関しては吸上げ管のみの吹込みの場合 (No. 4) と吸上げ管と真空槽の槽底から吹込みの場合 (No. 3) とを比較すると, 吸上げ管と真空槽の槽底から吹込みの方が Ar ガス吹込み総流量が少ないにもかかわらず, 脱炭速度が若干大きいことがわかる。

すなわち DH の場合でも, 極低炭素領域に関しては真空槽内での Ar ガス吹込みが有効なことを示している。これは真空槽底からの Ar ガス吹込みの方が吸上げ管からの Ar ガス吹込みに比べ真空槽内溶鋼の攪拌の強化に効果的であることを示していると考えられる。

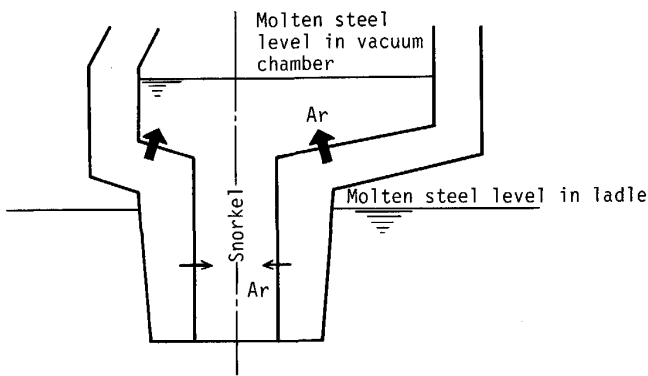


Fig. 7. Schematic diagram of Ar gas injection in DH.

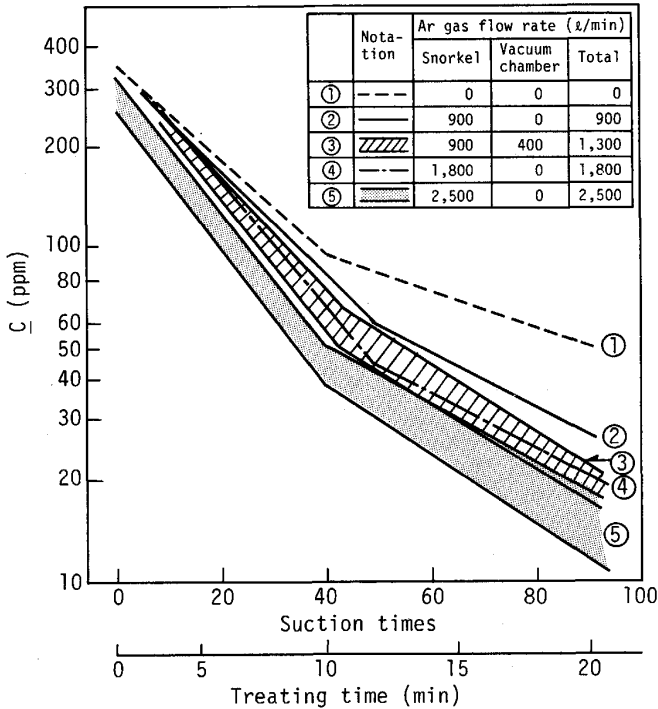


Fig. 8. Effect of Ar gas injection on decarburization rate in DH.

また DH 吸上げ管からの Ar ガス吹込みが RH 浸漬管からの吹込みに比べ、極低炭素領域での脱炭速度向上により効果的であるのは、RH の場合、浸漬管からの環流ガスが相当量吹き込まれているため、さらに吹込み量を増加してもその効果が小さいこと、また多量の Ar ガスを環流ガスとして吹き込んだ場合、環流量がかえって減少することが考えられる。

なお本技術において、DH の場合、溶鋼の吸上げ、吐出の繰返しのため、吸上げ管からの Ar ガス吹込みのパターンが重要である。すなわち槽の上昇により溶鋼が吐出されるときは吹込み Ar ガス量を低下させることによ

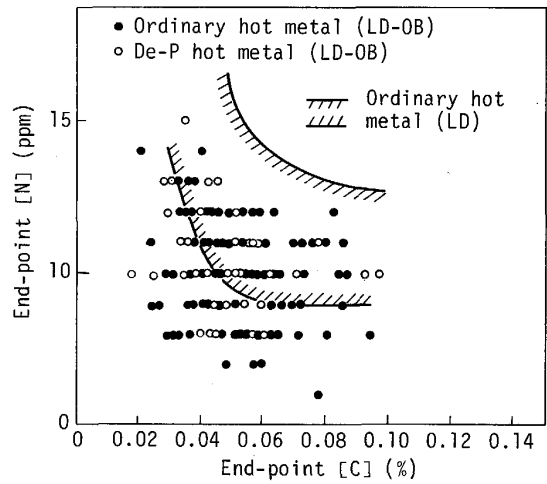


Fig. 9. Comparison of end-point [N].

り、取鍋内溶鋼の攪拌を促進させ、また、槽の下降により溶鋼が吸い上げられるときは吹込み Ar ガス量を増加させ、溶鋼の吸上げ促進と気泡脱ガスの促進を図っている¹⁵⁾¹⁶⁾。

以上述べた技術を総合化することにより RH、または DH 処理後 [C] < 10 ppm も可能となっている²³⁾。

3.2 低窒素化技術

低窒素化の基本的考え方は、溶銑予備処理及び上底吹き転炉における脱窒、さらに転炉出鋼以降、二次精錬、連铸工程での吸窒防止にある。

なお溶銑予備処理中、[N] の低下は著しく、脱珪、脱りん後約 10 ppm の値が得られるものの、転炉防止 [N] に及ぼす溶銑 [N] の影響に関しては、LD-OB のような強攪拌型の転炉ではあまり顕著な影響が見られず、現行技術では低窒素鋼製造に対する溶銑予備処理の脱窒の寄与は大きくない。転炉吹止め [N] に及ぼす溶銑予備処理、および上底吹きの影響について Fig. 9 に示す。転炉における低窒素化吹錬技術としては、前記強攪拌型の転炉の採用と、以下に示す炉内侵入大気からの吸窒防止が基本である。

- ① 吹錬末期での炉内正圧操業
- ② [C] 吹下げ防止
- ③ 吹錬末期での鉄鉱石添加、スラグフォーミング促進
- ④ 吹錬用酸素ガス純度の向上
- ⑤ ダイナミック制御による再吹錬の防止

また加工用冷延薄板製造の場合、未脱酸出鋼とはいえ極低窒素領域では出鋼時の吸窒が問題となるため、出鋼時間の短縮、出鋼孔からの溶鋼流を整流とするための出鋼孔形状の管理、等の細かな操業技術を適用している。

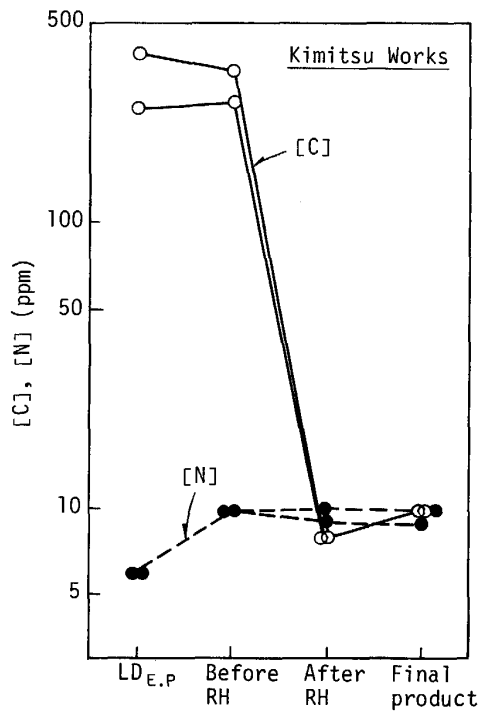


Fig. 10. Change in [C], [N] from LD_{EP} to final product.

さらに RH, DH の二次精錬では水冷フランジの採用, フランジボルト増締め, Ar シール等の対策により, また製造時は Ar シールドタンディッシュ, ロングノズルの Ar シール技術の確立により [N] が 10 ppm 程度の極低窒素領域でも吸窒が防止できる技術を確認した。

以上の極低炭化技術および極低窒素化技術を適用し, 君津製鉄所の上記工程で溶製された加工用冷延薄板の例として転炉吹止めから成品までの [C], [N] の推移を Fig. 10 に示す。

4. 結 言

新日本製鉄の各製鉄所ではラインパイプおよび加工用冷延薄板製造に関し以下のような高純化技術を確認した。

(1) 溶銑予備処理 (ORP 等), 上底吹き転炉および V-KIP (減圧下粉体吹込み), RH インジェクション, RH-PB (ともに RH 粉体吹込み) 等の多機能二次精錬の組合せにより, $[P] \leq 50 \text{ ppm}$, $[S] \leq 10 \text{ ppm}$, $[H] \leq 1.5 \text{ ppm}$ のラインパイプの量産技術を確認した。

(2) RH 槽内 Ar ガス吹込み技術, DH Ar ガス吹込み技術の確認, 上底吹き転炉の低窒素吹錬および転炉出鋼後, 二次精錬, 連铸工程までの吸窒防止技術の確認により $[C] \approx 10 \text{ ppm}$, $[N] \approx 10 \text{ ppm}$ の量産技術を確認した。

記 号

- A: 真空槽内断面積 (m^2)
 [C]*: 反応界面での平衡の鋼浴 C 濃度 (%)
 d: 気泡直径 (m)
 g: 重力加速度 (m/s^2)
 K: 平衡定数
 k: 物質移動係数 (m/min)
 h: 気泡発生限界溶鋼深さ (m)
 ΔP_{CO} : 過飽和圧力 (Pa)
 P_0 : 真空槽内溶鋼表面における雰囲気圧力 (Pa)
 V: 溶鋼の体積 (m^3)
 ρ : 溶鋼の密度 (kg/m^3)
 σ : 界面張力 (N/m)

文 献

- 野崎 努: 第 122・123 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1988), p. 209
- 荻林成章: 第 126・127 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1988), p. 198
- 大西正之: 第 126・127 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1988), p. 69
- 住田守弘, 安藤道英, 中村皓一, 野瀬正照, 中島啓之, 高崎義則: 鉄と鋼, **69** (1983), S959
- 桑島周次, 江田康幸, 山田谷三, 尾崎晴雄: 鉄と鋼, **72** (1986), S250
- 山本利樹, 佐藤 譲, 加藤秀夫, 本多清之, 島尾輝雄: 鉄と鋼, **73** (1987), S278
- 古崎 宣, 稲葉東実, 高本 久, 吉井正孝, 矢倉重範: 鉄と鋼, **73** (1987), S209
- 東 和彦, 小林 功, 占部教之, 小野山修平, 水上義正: 鉄と鋼, **72** (1986), S351
- 北村信也, 水上義正, 金子敏行, 山本利樹, 迫村良一, 相田英二, 小野山修平: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1801
- R. TSUJINO, J. NAKASHIMA, M. HIRAI and Y. YAMADA: ISIJ Int., **29** (1989), p. 92
- A. JACQUEMOT: Circ. Inform. Techn., **34** (1977), p. 1449
- 福永新一, 寺田 勉, 長野 裕, 佐藤正広, 皆川安生: 材料とプロセス, **1** (1989), p. 260
- 上田 新, 日名英司, 片桐忠夫, 大森 尚, 山本武美, 永井 潤: 鉄と鋼, **67** (1981), S888
- 大西保之, 伊賀一幸, 小林 功, 志俣教之: 鉄と鋼, **70** (1984), S254
- M. OKIMORI, A. MURASE, Y. NISHINO and N. HYAKUTAKE: Proc. 7th ICVM, Tokyo, Japan (1982), p. 1421
- M. TAKEUTI, Y. TAKEDA, H. KAWANISHI and N. MORITAMA: Proc. 8th ICVM, Linz, Austria (1985), p. 701
- 副島利行, 斎藤 忠, 松本 洋, 篠崎 薫, 三村孝毅: 鉄と鋼, **70** (1984), S981
- 東 和彦, 占部教之, 小野山修平, 嶋 宏, 赤林 豊, 東海林輝男: 鉄と鋼, **73** (1987), S188
- 例えば K. GUNJI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **10** (1970), p. 1
- 原島和海, 溝口庄三, 梶岡博幸: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 449
- R. TSUJINO, J. NAKASHIMA, M. HIRAI and Y. SAWADA: ISIJ Int., **29** (1989), p. 589
- 田口喜代美, 半明正之, 松尾和彦, 田中 久, 小倉康嗣: 鉄と鋼, **71** (1985), S1077
- 東 和彦, 小野山修平, 梅沢一誠, 渡邊 久, 大貫一雄, 水上義正: 材料とプロセス, **1** (1990), p. 168