

当社における高純度／清浄鋼の製造技術

Production Technology for High Purity Steels in Our Company

山口 進 / Susumu Yamaguchi ・ 本社 鉄鋼技術部 専任部長

要 約

高純度／清浄鋼に対する高度・多様な要請を受け、製鋼なかでも精錬プロセスはこの 20～30 年の間に大きく変革した。当社量産製造ラインにおける清浄性を保証するベースプロセス、品種ごと特徴ある高純度／清浄化要望に対応する当社独自技術を加味した製造技術、ステンレス鋼の特徴も含めその概要を解説する。

Synopsis

Responding to the greater sophistication and variety of demand for highly purified/clean steels, steelmaking, particularly the refining process, has greatly advanced in the past 20 to 30 years. I would like to explain outline three aspects of the mass production line in our company.

- (1) Basic process which guarantees the cleanliness of steels
- (2) Steelmaking technology including original technologies to meet demands for highly purified/clean steels, characterized for individual steel grades
- (3) Stainless steel

1. はじめに

省エネルギー、生産性向上、地球環境課題と言ったその時代の社会的要請を受け、需要家・産業界における鋼材の使用環境はますます苛酷化し、あわせ高機能化など使用用途の拡大が進行した。これらに呼応して鋼材の高純度／清浄化ニーズはより高度により多様に推移した。

高純度／清浄化を実現するのは製鋼工程なかでも精錬プロセスであるが量産品種で見たとき以前はこれらの要請に対しては転炉一工程のみで対応していたが、この 20～30 年の間にプロセスは大きく変革した。転炉の前工程に溶銑予備処理設備を下工程に二次精錬設備を多くの技術開発・改善を経て導入・付加してきた。その結果各元素の精錬限界は飛躍的に進歩した¹⁾。

ここでは高純度／清浄化ニーズの概況、当社量産製造ラインにおける全製品の清浄性を実現するベースプロセスの構築、品種ごと特徴ある高純度／清浄化要望に対応する当社独自のハード・ソフト技術を付加した製造技術について解説する。なお、ステンレス鋼における特徴についても言及する。

2. 高純度／清浄化ニーズ

本報では高純度化とは C, P, S, N, O, H などの成分元素をベース品より低減する対象を、また清浄化とは介在物レベルを厳しく管理したり、また用途に応じ介在物の球状化を計るなどの形態制御を指すこととした。

そのニーズの特徴的な事例は第 1 表のとおりである。

第 1 表 高純度化ニーズの代表例

Table 1 Background for necessity of high purity steel

分 類	高純度化の背景		高純度化要望元素
製品性能ニーズ	薄 板	深絞り用途の加工性 連続溶融亜鉛めっきに合致した材料	C, N
	厚 板	ペンストック、海洋構造物の強度／靱性	P, S, N
	大 径 管	サワーガス環境下の耐 HIC 特性	P, S, H, N
	パイプ／条鋼	軸受鋼の転動疲労特性	O, Ti
	ス テ ン レ ス	高クロム含有フェライト系ステンレス鋼の耐食性	C, N
プロセスニーズ	薄板／厚板…	加熱炉への熱片装入や直接圧延	S, N, O

	溶銑予備処理	転 炉	二 次 精 錬
転炉導入期		脱 C 脱 P 脱 S...	
'70 前後	脱 S	脱 C 脱 P...	脱 H 介在物低減 成分/温度調整...
'80 代以降	脱 Si 脱 S 脱 P	脱 C 低 P 脱 O...	脱 H 介在物 成分/温度 脱 N 極低 極低 介在物 ... 低減 調整 C 化 S 化 組成制御

第1図 当社高炉・転炉プロセスにおける精錬機能の主な分担の推移

Fig.1 Change of refining functions in our BOF process

3. 高純度／清浄化を実現する製鋼技術の革新

高純度／清浄化を実現する精錬工程では、個々の元素ごとにその冶金特性に応じた低減技術の開発・改善を実施した。

高炉・転炉プロセスにおける最も特徴的な革新は、第1図に示すごとく当初転炉にすべての精錬機能が集約されていたが、個々の成分元素の低減や介在物コントロールなどの新たな機能を転炉の前後の工程に導入・付加してきたことである。すなわち精錬機能の分化が進行したことである。

なお、この機能分化の模様は電炉プロセスについても同様に展開した。

高炉・転炉プロセスについてはその導入期は脱 S、脱 P、清浄化などすべての機能は転炉に集約されていたが技術進歩を経て 1980 年代以降の精錬機能の分化の様子は、

①溶銑予備処理技術の開発により脱 S、脱 P は主に転炉の前工程で処理されるようになった。

②転炉の主機能は脱炭となり底吹きガスバブリングを行う複合吹錬技術の開発²⁾によりスラグ・溶鋼ともに過酸化状態を回避できるようになったのが大きな進歩である。

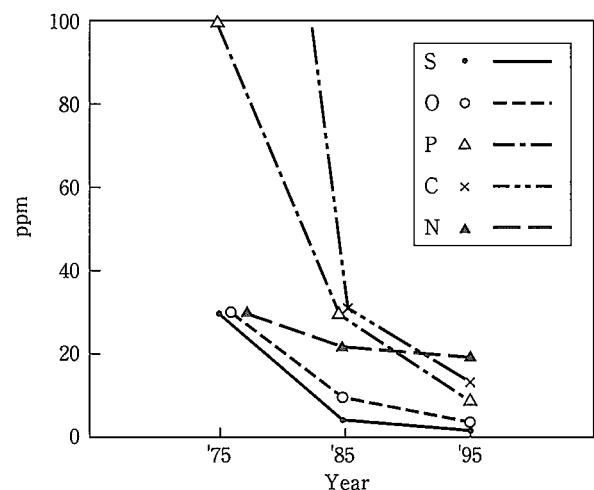
この技術は後に述べる極低炭素鋼製造を容易にし、更に N や酸化物系介在物の低減、歩留向上にも寄与している。

③脱 H、極低 C 化、極低 S 化、脱 N、介在物低減、介在物形態制御などの多岐の機能が、攪拌、真空、加熱、粉体インジェクションなどの要素技術を選択的に組み合わせた多様な二次精錬装置に委ねられるようになった。加え二次精錬装置は連続鋳造化により、一層重要となった溶鋼温度と成分の高精度の制御を可能とし安定した品質の保証に寄与している。

精錬機能分化の狙いは高純度／清浄化の極限追求と大量処理の実現であるが、単純な機能分化は処理設備数の増加に伴う経済的負担や工程延長に伴う熱ロス増加によるエネ

ルギー損の発生、耐火物コストの増加など課題があったが、製鋼プロセスサイドでのプロセスの高速化・大型化などと相まって精錬機能の分化は経済性を維持しながら進行してきたと言える。

これら技術による当社の各成分の精錬限界の推移は、第2図に示すとおりである。



第2図 当社高炉・転炉系の精錬限界推移

Fig.2 Change of impurity content in high purity steel in our BOF process

4. 製品分野別 当社精錬プロセスの特徴

4-1 鋼板・鋼管

4-1-1 全製品の清浄化を狙う

ベースとなる精錬プロセスの思想

前述の分化した精錬プロセスにおいて、従来は例えば溶銑脱 P 処理は低 P を必要とする品種についてのみ適用する“必要用途への選択的な適用”が経済性視点に基づく使い方であった。

当社は全量溶銑脱 P 処理と他の要素技術を組み合わせ“全

第2表 すべての製品の清浄化を狙うベースとなる精錬プロセスの思想

Table 2 Concept of refining process which basically guarantees cleanliness for all steel grades

	溶銑処理		転 炉		取鍋二次精錬	鑄 造
	溶銑脱 S →	溶銑脱 P →	転炉	→スラグカット→	RH →	CC →取鍋スラグ検知
従来の選択的適用プロセス	▲	▲	○	▲	▲	○ ▲
清浄化を狙うプロセス	○	○	○	○	○	○ ○
適用技術	KR	SRP 転炉型脱 P	STB	スラグ検知器 スラグストッパー	RH-(PB)	スラグ検知器

全量適用 ～○ 選択的適用 ～▲ STB=Sumitomo Top and Bottom Blowing Process

製品について酸化物系介在物をミニマイズし清浄性を一段向上させたプロセス体系を基本思想”として適用することとしている。これはベース鋼についてもある一定以上の品質を保証する体制の構築を意味するものである。現在鹿島製鉄所で一部完成し、引き続き鹿島、和歌山両製鉄所に適用を企図している。

そのプロセス体系は第2表に示すとおりである。

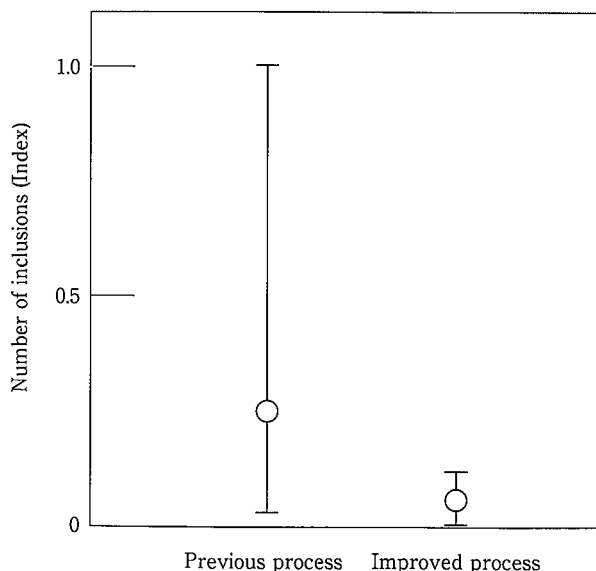
全製品が清浄化できる背景は、

- ・酸化物系介在物低減のためには、連続鑄造工程での大気による二次酸化防止なども重要であるが、転炉から取鍋内に流出する酸化性スラグの性状と量が大きく影響していることはよく知られている。

鋼中酸化物系介在物=f(スラグ中(FeO),

取鍋内流出スラグ量, 二次酸化…)

- ・スラグ中(FeO)については、溶銑脱 P を全量実施することにより転炉での脱 P 負荷が軽減され(FeO)を常に



第3図 鋼中酸化物系介在物改善状況

Fig.3 Improvement of oxidised inclusion

低位に安定化させることが可能となる。

- ・取鍋に持ち込まれるスラグ量は転炉でのスラグ流出検知器とスラグカット技術の導入により低減することが可能となった。
- ・更に RH の全面適用により、より一層安定した品質保証が可能となる。

これらの効果による鋼中酸化物系介在物のレベルとバラツキは第3図に示すとおりである。

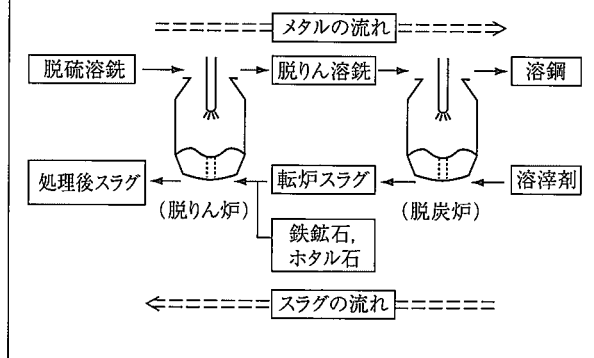
なお、当社独自開発の溶銑脱 P プロセス SRP (Simple Refining Process) を第4図に示す³⁾。

＝当社が開発した溶銑脱 P プロセス＝
プロセスの特徴

2基の上底吹き転炉を使い、一方を溶銑脱 P 炉(左図)他方を脱 P 銑の脱 C 炉(右図)とし、脱 C 炉で発生する転炉スラグを脱 P 炉の脱 P フラックスとして再使用し向流精錬を行う

長 所

- ・高能率の結果大量処理が可能
- ・系外への発生スラグが少なく地球に優しい



第4図 SRP の概要

Fig.4 Outline of SRP (Simple Refining Process)

4-1-2 高純度／清浄鋼の特徴

鋼板と鋼管を造る基本の精錬プロセスは前述のとおりであるも、高純度／清浄化を必要とする品種については特性

を配慮したプロセスにより製造している。

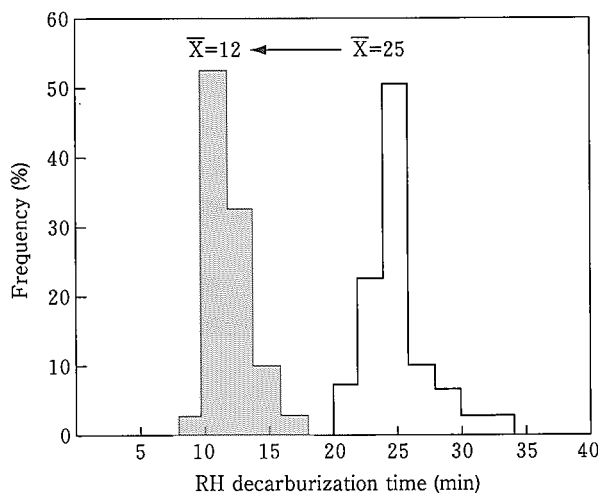
これら特徴的な品種の代表事例について以下に述べる。

(1)極低炭素鋼

極低炭素鋼は現在自動車用冷延鋼板の主力鋼種になっているが、歴史的には 1980 年代以降に工業化された比較的新しい材料である。精錬段階で C と N を可能な限り低減し、C や N と化合物を形成する Ti, Nb をその当量以上添加することによって柔らかくて非時効性の IF (Interstitial Free=固溶 C, N が無い) 鋼ができ、かつ従来のアルミキルド鋼よりも更に高い r 値が得られる⁴⁾。

防錆強化という自動車側のニーズから溶融亜鉛めっきが使われるようになったが、連続溶融亜鉛めっきプロセスでは連続焼鈍プロセスと異なり過時効処理を行えないため、非時効性を有し優れた加工性を示す極低炭素 IF 鋼は溶融亜鉛めっき鋼板に不可欠な鋼種となった。本鋼種が工業ベースで採用されるようになったもう一つの動機は製鋼段階でのコストと品質面での改善が見込まれたからでもある。

極低 C への脱 C を受け持つ真空脱ガス設備は RH であるが、当社では処理時間短縮、コスト増抑制、適中率向上を目的に ①排気能力向上 ②浸漬管径拡大 ③終点判定システムなどの開発を行った⁵⁾。これらの成果である脱 C 処理時間の短縮の状況を第 5 図に示す。



第 5 図 極低炭素鋼における RH 脱炭時間の短縮

Fig.5 Reduction of RH decarburization time at ultra low C steel

品質面の主要テーマは、酸化物系アルミナ介在物の低減であったが精錬から CC に至る総合的な改善を実施した。

(2)高級電磁鋼板

岡野ら⁶⁾が本誌“RH 粉体上吹法による極低硫鋼溶製技術の開発” (p.65) にて詳細報告しているように、トランスおよびモーター等の材料として使用される高級電磁鋼板は鉄

損傷および磁束密度などの特性を満足させるために極低 S, 極低 N, 極低 C が要求される。これらを実現するために当社で開発した、RH 粉体上吹き技術、RH-PB (RH-Powder Top Blowing) において脱硫フラックスを吹き込むことにより、S は 5 ppm 以下、N は 15 ppm 以下を達成することができるようになった。

(3)耐サワーガスラインパイプ

石油や天然ガスの開発が旺盛になりこれに使用される油井管、ラインパイプはフィールドの深海化、輸送効率の向上により X-65 から X-70 へ更に X-80 の具体的引き合いが出てくる程に高強度化が進行している。

本鋼材の要求特性は延性、低温靱性、溶接性、耐 HIC (Hydrogen Induced Cracking) などであるが、耐 HIC 試験の評価方法も従来の NACE 条件から CAPCIS 条件、FORCE 条件と言ったより実管に近い評価方法が提案されます⁷⁾。高強度材の HIC 割れ対策には、極低 S 化、介在物の低減と Ca 添加による介在物組成制御が不可欠のため、製造は前述の基本プロセスに溶鋼脱 S と Ca 添加機能を付加して行っている。

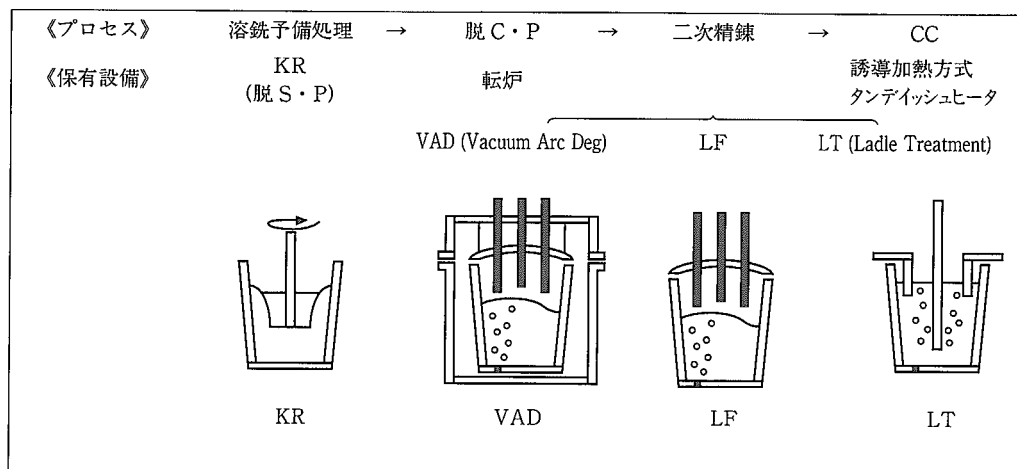
なお、当社は最近 X-80 耐サワーガス用に世界で初めてサンプル出荷に成功した。

4-2 特殊鋼条鋼

高純度/清浄鋼から見た代表品種は疲労特性、加工特性等への要求から軸受、肌焼鋼、タイヤコード、弁バネなどである。高純度化については、軸受と一部肌焼鋼でシングル ppm オーダーの T-[O]が必要である。また品種ごとに管理する内容は異なるが、すべての品種に共通した要求は高純度化でありその具体的内容は介在物総量低減、介在物小型化、硬質介在物の排除、介在物を無害化への形態制御などである。これらを達成するための当社のハードは、第 6 図に示すとおりで目的に応じ組み合わせ使用している。当社の特徴の一つである、軸受などの T-[O] 低減に対し精錬工程のみならず CC の誘導加熱方式タンデイッシュヒータが貢献している事例について紹介する。

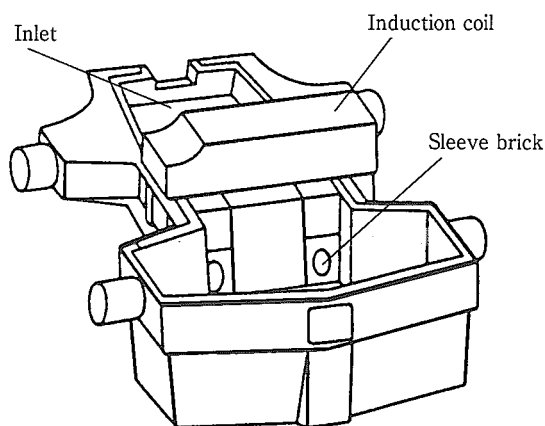
この原理は、タンデイッシュ内に注入された溶鋼が誘導加熱されているスリーブ内を通過する際、溶鋼は電気的なピンチ力を受けその反作用として介在物が壁面に移動し併せ凝集肥大化し壁に付着していく、その結果通過溶鋼から介在物が除去されることとなる。その状況を第 7 図、第 8 図に示す⁸⁾。

本製造法はシームレスパイプから造る軸受にも適用されている。



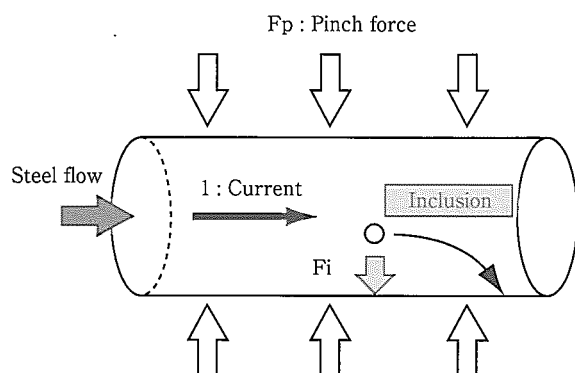
第6図 特殊鋼条鋼の製造プロセス

Fig.6 Outline of producing high quality bar and wire rod



第7図 誘導加熱方式タンディッシュヒータ

Fig.7 Outline of induction tundish heater



第8図 ピンチ効果の概念

Fig.8 Concept of pinch force effect

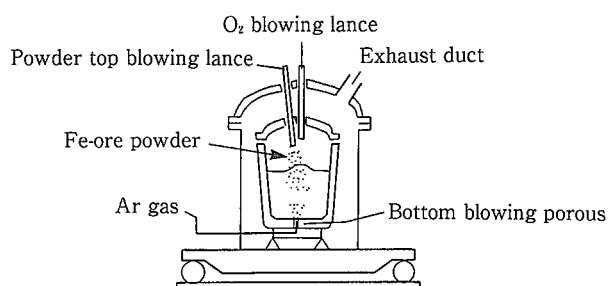
4-3 ステンレス鋼

(1)高純度フェライト系ステンレス鋼

フェライト系ステンレス鋼はCrあるいはMoの増加とともに耐食性および耐隙間腐食性が向上する優れた特性があるが、この特性を享受するにあたっては溶接部の耐食性および靱性の観点から[C]+[N]の低下が必須である。

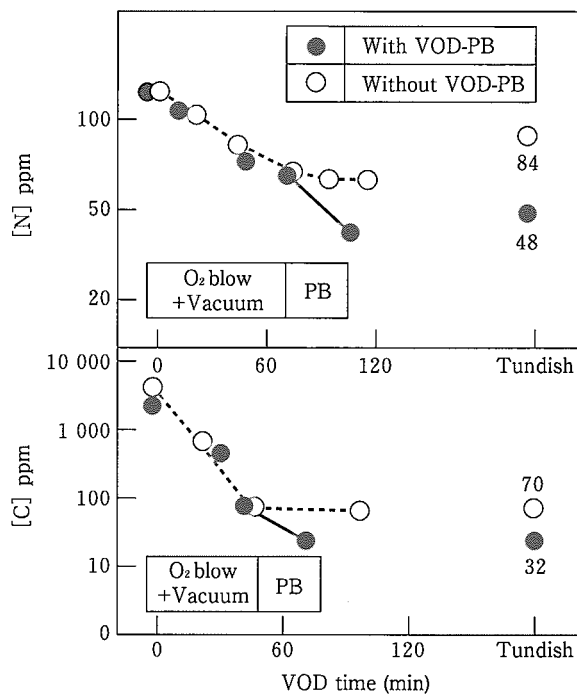
当社はこれら高純度フェライト系ステンレス鋼の需要増加に対応するためVOD(Vacuum Oxygen Decarburization)を導入してきた。更に屋根材や熱交換用パイプに使われる高Cr含有フェライト系ステンレス鋼の溶製に必要な極低C、極低N実現のため当社独自の技術であるVOD-PB(Power Top Blowing)を導入した。その結果30Cr鋼においても[C]+[N]=80ppmを達成し特性の良好な製品を製造する体制を和歌山製鉄所と関西製造所で実現している。

VODとVOD-PBの設備の概要を第9図に、VOD-PBによる30Cr鋼の脱C、脱N挙動を第10図に示す⁹⁾。



第9図 VODおよびVOD-PB法の模式図

Fig.9 Schematic view of VOD and VOD-PB method



第10図 VOD精錬および製品の[C], [N]挙動
Fig.10 Change of [C] and [N] during VOD refining and tundish

(2)半導体用超清浄度クリーンパイプ・スミクリーン M

極低 Mn ($\leq 0.05\%$) を特徴とする超清浄な 316 L ステンレス鋼管スミクリーン M は、16~64 M ビット級 DRAM の製造に要求される超クリーンガスの配管材料として多用

されている。半導体製造プラントのガス供給配管系は、配管総延長が 20~30 km にも達し、鋼管・継ぎ手・バルブ等を主として溶接により組み立てられ、溶接箇所は数千箇所にも達している。

この溶接によってヒュームが発生し、配管系のガス汚染の主因となる。そのメカニズムは、

- ①溶接により大量に生じるヒューム(パーティクル)は、その大部分が蒸気圧の高い Mn である。
- ②また Mn は溶接部近傍に再付着し、そこでハロゲンガスにより腐食し、Fe, Cr からなる腐食生成物を生成し重金属汚染を起す。
- ③更に鋼中の Al, S, O 量が多いと溶接部の健全性を阻害する、等である。

この汚染メカニズムに立脚し、発塵極低化を考慮した成分設計指針(極低 Mn, Al, S, O)を確立した。更に超清浄化の溶製法として、特殊溶解設備である真空誘導溶解炉 VIM (Vacuum Induction Melting) + 真空アーク再溶解炉 VAR (Vacuum Arc Remelting) による真空二重溶解法を採用した。

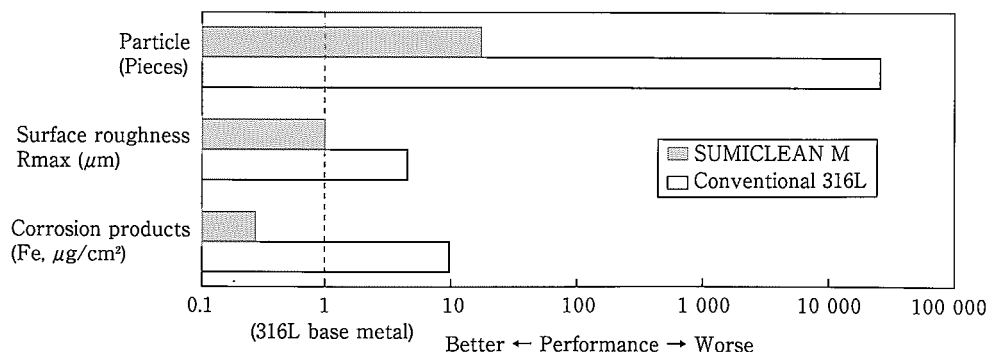
スミクリーン M と通常の 316 L とを比較した化学成分と溶接部の性能を第 3 表と第 11 図に示す¹⁰⁾。スミクリーン M は 316 L に比べパーティクル発生量、パーティクル発生源となる表面粗さ、腐食による重金属汚染において性能は画期的に向上している。

第3表 スミクリーン M の化学組成 (mass %)

Table 3 Chemical composition of SUMICLEAN M (mass %)

Steel	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo	Sol. Al	O
SUMICLEAN M	≤ 0.01	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.002	14/15	17/18	2.5/3	≤ 0.01	≤ 0.002
Conventional 316 L	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.03	12/15	16/18	2/3	(0.025)	(0.02)

() : Typical value



第11図 溶接部発塵特性

Fig.11 Comparison in impurities emission at welded part

技術解説

5. まとめ

鋼材の高純度／清浄化要望は社会的要請を受け高度、多様に展開してきた。これら要望に応える精錬プロセスはこの20～30年の間に大きく革新し、その結果精錬限界は飛躍的な進歩を遂げてきた。

今後は地球温暖化やリサイクルなどの地球規模の環境課題への展開や日本型経済社会に対する変革要請を受け、社会、産業界ではかつて経験のないパラダイムシフトも予測される。

需要家・産業界の変革を契機に鋼材に対しては、これまでとは異質の高純度／清浄化要望、新たな機能への期待等、当面需要家、鉄鋼メーカー間にテーマは尽きないと考えら

れる。

地球環境との調和、限界への挑戦、トータルでの経済合理性と言ったキーワードを中心に本テーマは今後も技術開発が展開されて行くと考ええる。



山口 進 / Susumu Yamaguchi

本社 鉄鋼技術部
専任部長

(問合せ先：03(3282)6185)

参考文献

- 1) 雀部 実：第90・91、143・144回 西山記念講座
- 2) 姉崎正治、山崎 勲：鉄と鋼，**76**(1990)，p.1775
- 3) 松尾 亨、増田誠一：鉄と鋼，**76**(1990)，11，p.1809
- 4) 岡本篤樹：住友金属，**48-4**(1996)，p.14
- 5) M.Tanaka, T.Obana, H.Ikenaga, K.Yoshida and S.Kouroki：29th Annual Conference of Metallurgists, CIM, 1990
- 6) 岡野博義、田尻裕造、佐藤光信、深川 信、真目 薫：住友金属，**50-2**(1998)，p.65
- 7) T.Kushida, Y.Higuchi, M.Numata, A.Yamamoto, K.Oni-

shi, A.Teraguchi and J.Fujino：The Sumitomo Search, No.58, Sep. 1996, p.24

- 8) 木村和成、三島健士、田村 明、亀子伸二、平野正一、丸田陽一、山中章裕、岡村一男：住友金属，**48-2**(1996)，p.85
- 9) 中川敬太、興梠昌平、真目 薫、真屋敬一：住友金属，**49-4**(1997)，p.20
- 10) 寺西洋志、古堅宗勝、東茂 樹、安藤善信：住友金属，**49-4**(1997)，p.89