

もに非延性の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系介在物が原因といわれており、低融点介在物への形態制御を完全に行うことが望まれている。

(2) の材質向上に関して、軸受鋼は高度な信頼性を得るために、転動疲労寿命の延長とばらつき低減が要求される。Fig. 3.5 に転動疲労寿命と酸素値の関係を示す。酸化物系介在物は圧延などによっても伸びず、マトリクスとの間にボイドが生じて応力集中源となりはく離を引き起こす。その軽減のためには酸素濃度の減少と低位安定化が肝要である。厚板分野では、低温靱性や材料の異方性、溶接性を改善するために従来から P, S, H などの不純物元素の低減がなされてきたが、より苛酷な環境下での使用に伴って、いっそうの低減が要求されている。なかでも耐サワーラインパイプ用鋼は、Fig. 3.6 に示すように材質および品質要求が年々厳しくなっており、硫化水素などの腐食性ガス環境下での水素誘起

割れ (HIC) に対する十分な対策が望まれている。不純物元素の低減とともに中心偏析の低減技術や Ca による介在物の形態制御技術なども製鋼での重要な対応策である。

このような需要家の多様で厳しい要求に対して、溶製から鋳造段階まで最適な製鋼プロセスを選択して高品質の鋼を安定製造することが今後より重要となる。

### 3.2.2 高品質鋼製造プロセスの進歩と今後の課題

#### (1) 溶銑予備処理と転炉精錬の機能分担

溶銑脱硫処理に加えて、溶銑脱磷と、その前段階としての脱珪処理の研究開発が 1985 年頃までに鉄鋼各社で盛んに実施された。同時に、それぞれの製鋼工場のおかれた条件に従い、既存の高炉-転炉プロセスの中に工業生産規模のプロセスとして組み込まれた。

この脱磷処理も含む溶銑予備処理の研究開発は、精錬コストの低減および低硫・低磷濃度の高純度鋼溶製要求への対応とされてきた。最近ではこれらに加え、溶鋼中酸素濃度の低い高純度鋼溶製のために、溶銑脱磷処理が有効であるとの指摘がされ(後述)、大量生産鋼種である低炭素鋼・極低炭素鋼にも適用が拡大されてきている。

1985 年以後の 10 年間に実施された、溶銑予備処理精錬とこれに引き続く転炉精錬のプロセス開発研究の特色を以下に 5 点述べる。

##### i) 溶銑予備処理精錬自体の最適化

まず、溶銑脱磷処理自体の最適化の研究として、脱磷と同時に復磷までも考慮した基礎研究、CaO と O<sub>2</sub> の供給速度比、フラックス組成、吹き込み条件の最適化を目的とする実験などがある。

##### ii) 予備処理された溶銑を用いる転炉精錬の最適化

溶銑予備処理により Si, P, S 濃度が低下した溶銑の転炉精錬を行う場合、転炉の役割は脱炭と温度調整のみに簡略化される。予備処理された溶銑を用いる転炉精錬時の冶金特性、鉄およびマンガン歩留り、ダスト発生などの現象把握は、1986, 87 年頃までにはほぼ終了した。その後、Fe の過剰な酸化を抑制しつつ要求される C 濃度まで脱炭する吹錬方法について研究が行われた。

例えば、従来提案されていた転炉内での優先脱炭指標である ISCO, BOC に代わり、上吹き酸素と底吹き酸素の寄与を分離した指標、I<sup>1)</sup>、によれば各種上底吹き転炉の冶金特性が統一的に整理でき、送酸速度や上底吹き流量比率などの吹錬条件の設計が可能となることが示された。また、転炉吹錬終了時点の [%C], [%O] が気相の CO 分圧により決まるのではなく、火点、スラグ/メタル界面での平衡と、バルク溶鋼-スラグ-火点の間の物質移動で速度論的に決定されるという新規な提案が実績値に基づく数値シミュレーションにより示

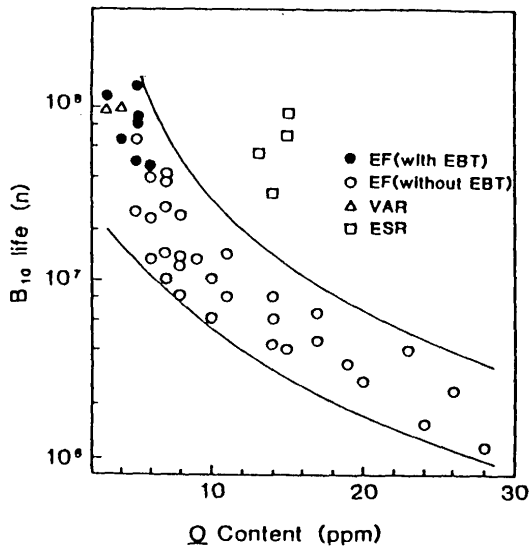


Fig. 3.5. Relation between B<sub>10</sub> life and O content. (Tetsu-to-Hagané, 74 (1988), p. 1889)

Requirements	'65	'70	'75	'80	'85
Grade API 5L	X52 ~ X60	X65	X70		X80
WT/OD (%)	2%	3%			5%
Toughness requirement	Charpy	DWTT 30°F			90 ft-lbs
--- DWTT		-5°F			60 ft-lbs
--- Charpy energy	25 ft-lbs	45 ft-lbs			-20°F
Ceq. requirement (IIW %)	0.45	0.43	0.40	0.39	0.38
Anti-corrosion requirement	Accidents				0.35
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Persian Gulf</li> <li>Saudi Arabia</li> <li>Canada</li> <li>Quatar</li> </ul>				
	BP solution HIC test				
	NACE solution HIC test				

Fig. 3.6. Change of quality requirement for high strength line pipe steel. (Tetsu-to-Hagané, 80 (1994), p. 263)

<sup>1)</sup> ISCO, BOC, I: これらは、いずれも転炉内での脱炭反応をマクロにとらえ、反応界面への酸素供給速度、炭素の反応界面への移動速度、反応界面の CO 分圧を操業因子により推定し、組み合わせて指標化したものである。

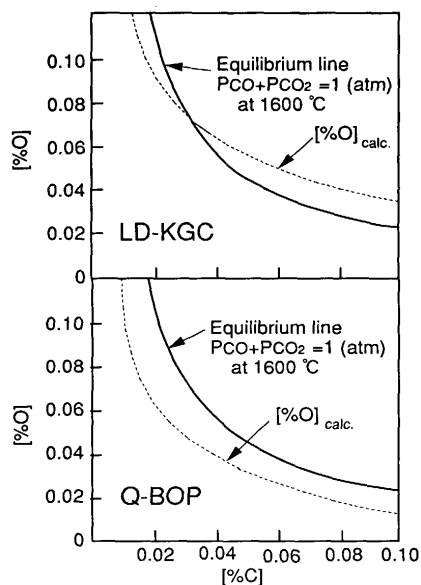


Fig. 3.7. Illustration of mathematical model describing decarburization and deoxidation in a converter and behavior of  $[\%O]_{\text{calc.}}$  during blowing in LD-KGC and Q-BOP. (*Tetsu-to-Hagané*, 75 (1989), p. 1300)

された (Fig. 3.7 参照)。これらの研究からも、従来から言われていた吹錬末期の送酸速度低減による冶金特性の向上 (吹錬終了時点での  $[\%O]$ ,  $(\%T.Fe)$  の低下) が示唆された。

以上のように、溶銑予備処理精錬とその処理後の溶銑を用いる転炉精錬は、この 10 年間に大量処理用設備の完成と操業の最適化がほぼ完了した。さらに、以下に述べるようないくつかの新たな展開に結びつけられた。

### iii) 予備処理された溶銑を用いるクロム鉱石、マンガン鉱石の溶融還元への利用

脱燐された溶銑の転炉精錬では、スラグ量が顕著に低減される。このため、低  $[\%C]$  まで脱炭酸素効率が高く、Mn の溶鋼中への歩留まりが向上することが確認された。また、転炉内での脱燐精錬から解放されるため、所望の中・高炭素濃度で吹錬を終了することができ、この点からも Mn の歩留まりが向上される。この特徴をさらに利用するため、マンガン鉱石を積極的に転炉内に添加して Mn の還元回収をする操業が行われるようになった。

現在では製鋼工場のおかれたローカルコンディション (溶銑脱燐処理能力、製造鋼種、原料価格など) に応じて、Mn 源としてフェロマンガンとマンガン鉱石とを使い分ける操業方法がとられている。

一方、脱燐された溶銑を転炉に装入後、クロム鉱石とコークスを添加し、溶融還元法によりステンレス母溶湯を溶製するユニークなプロセスが開発され、ステンレス鋼製造プロセスとして採用されている。この溶融還元操業で多量に使用されるコークス中の P は、ほぼ全量溶湯に移行する。クロム含有溶湯の脱燐処理は熱力学的に困難であるため、ベースメタルである溶銑の  $[\%P]$  を低濃度まで (例えば、0.02% 以下ま

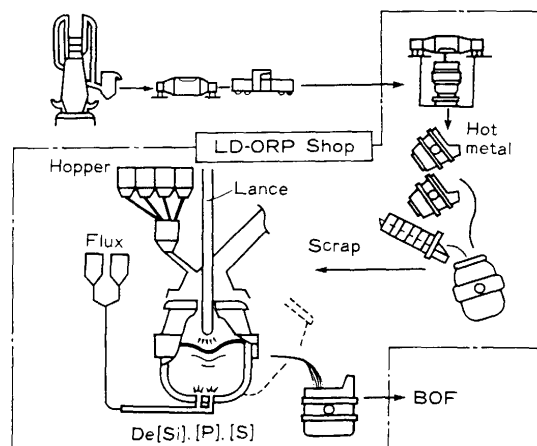


Fig. 3.8. Schematic view of hot metal pretreatment process in a top and bottom blowing converter (LD-ORP). (*CAMP-ISIJ*, 4 (1991), p. 1153)

で) 低下させておく必要があるが、溶銑脱燐操業の最適化により完全に要求が満たされている。ニッケル鉱石の溶融還元をクロム鉱石の溶融還元在先立ち行うプロセスも開発されたが、ここでは脱燐処理は含 Ni 溶銑に対して行われる。

### iv) 転炉を用いる溶銑予備処理プロセスの発展と脱炭用転炉との有機的な結合

溶銑予備処理のための精錬容器として、従来からトピード・溶銑搬送鍋・溶銑装入鍋が利用され現在でも多くの製鋼工場でこれらの設備が稼働している。一方、転炉を用いた溶銑予備処理方法は、1980 年に底吹き転炉を用いた実験が報告されている。1987 年以降、いくつかの工場では、転炉を利用した予備処理プロセスを採用する動きがでてきた。

例えば、粉体吹き込み用ランスを転炉内溶銑に浸漬させて処理を行う H 炉 (1987 年)、2 基の転炉を組み合わせ、脱炭用転炉で発生したスラグを溶銑予備処理用の転炉で再利用する SRP (1990 年)、溶銑予備処理と同時にスクラップ溶解機能も持たせた転炉に改造した LD-ORP (1991 年) が挙げられる (Fig. 3.8)。

これらの転炉を利用した溶銑予備処理プロセスは、以下のような転炉の設備的な特徴を利用している。すなわち、転炉は炉内空間が大きいので、精錬ガス供給速度を大きくしても溶銑やスラグの系外への飛散が防げる。また、これによりスラグ、メタルの強攪拌が得られ、脱燐剤の利用効率が高くでき、短時間かつ少量の精錬剤で処理が可能であるのと同時に、溶銑温度低下が最小限に抑えられる。

しかし、炉内容積が大きいことは耐火物使用量が大きく設備の維持管理負担が大きいなどの欠点も有するので、既存転炉の流用が可能な場合についてのみ成立し得ると考えられる。

### v) 溶銑予備処理と高品質鋼溶製との関係

前項で述べた高品質鋼ニーズの増大に対応し、溶鋼段階での清浄度の向上、すなわち非金属介在物 (酸化物) 低減の要

求が強くなっている。脱酸生成物であるアルミナの除去（脱酸）と、溶鋼中 Al とスラグ中易還元性酸化物（Fe<sub>2</sub>O、MnO など）の反応によるアルミナの生成防止（再酸化防止）とが従来にも増して重要になってきた。

後者のために、最近では転炉出鋼後の取鍋内スラグをアルミニウム（アルミ灰などの利用）により還元する処理（「スラグ改質」と呼ばれる）が極低炭素鋼や缶用鋼板向けに実施されるようになった。この還元処理時のスラグ中（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）の還元による溶鋼中への復燐を抑制するために、転炉内に持ち込まれる燐量の減少が必須であり、上述した溶銑脱燐処理は高純度鋼溶製に必要なプロセスとして位置づけられ始めている。

(2) 二次精錬技術の深化と多様化

この 10 年間で、二次精錬分野で最も進歩が大きかったのは極低炭素鋼の大量生産を可能とする RH 脱炭プロセスの研究開発である。極低炭素鋼を比較的容易に大量に溶製するための指針として、RH での脱炭反応を数学モデルにより定量的に解析できるようにした住田・藤井らの次式が有用であった。

$$C = C_0 \exp(-Kt)$$

$$K = \frac{Q}{W} \left\{ \frac{ak}{ak + Q/\rho} \right\} \dots\dots\dots(3-1)$$

ここで、C、C<sub>0</sub>：溶鋼中炭素濃度および初期炭素濃度、K：脱炭速度定数、t：時間、Q：環流速度、W：溶鋼重量、ρ：溶鋼密度、ak：脱炭反応の容量係数である。また、Q を求めるのには、実測値や桑原らが提出した経験式が用いられた。

K を増大するためには Q の増加が有効であり、環流管径の大型化、環流 Ar 流量の増大などの手段が採られた。また、ak の増大のために真空槽内への Ar の大量吹き込み、環流管（上昇管）直下への粉体吹き込み（RH-FI 技術）が実施されている。さらに、脱炭処理末期には CO ガス発生量が低下し ak が小さくなることを回避するため、H<sub>2</sub> を環流ガスの一部として使用し、いったん溶解した水素が真空槽内で再び発生する際のボイリングにより、特に [C] < 25 ppm 以下の極低炭素濃度域での脱炭速度を向上する新規な技術も実規模で開

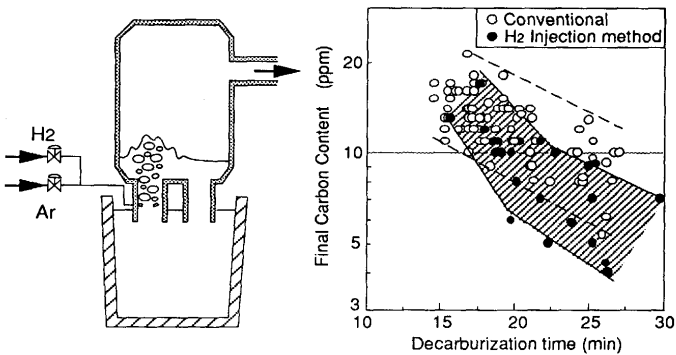


Fig. 3.9. Process outline and operational results of hydrogen injection for decarburization of ultra-low carbon steel at the RH degasser. (Kawasaki Steel Giho, 25 (1993), p. 283)

発された (Fig. 3.9)。

これらの研究開発により、現在では 25 分程度の脱炭処理により [C] < 15 ppm の超極低炭素鋼が安定して溶製できるようになっている。

以上の実操業での研究開発に加え、極低炭素濃度域での脱炭反応機構の基礎研究がいくつかなされた。すなわち、ある条件では界面での化学反応律速が無視できないこと、RH 処理時の脱炭反応の律速段階が、[C]、[O]、および環流量に依存すること、真空槽内の溶鋼表面の攪乱が脱炭反応へ寄与すること、などの重要な知見が得られた。

新規な RH 処理技術として、脱炭反応に必要な高い酸素濃度を維持するため、および真空槽内での CO の二次燃焼により溶鋼温度低下を抑制する目的で、真空槽内の溶鋼に上方からランスにより酸素を供給する技術（KTB 技術）が開発され、多くの RH 設備で使用されるようになった (Fig. 3.10)。

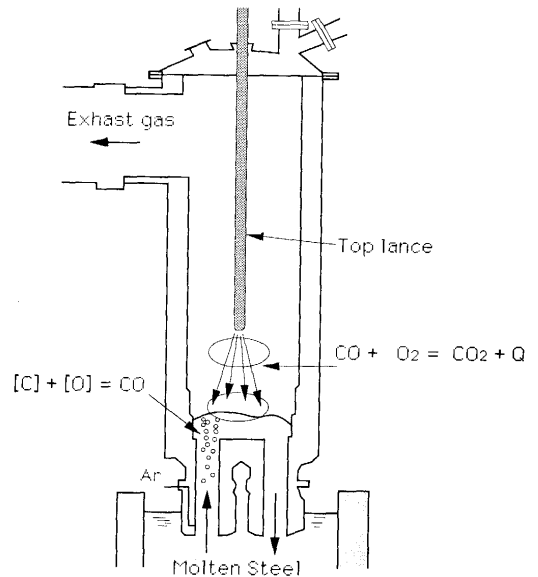


Fig. 3.10. Schematic view of oxygen top blowing during vacuum degassing in RH vessel (KTB method). (Kawasaki Steel Giho, 23 (1991), p. 136)

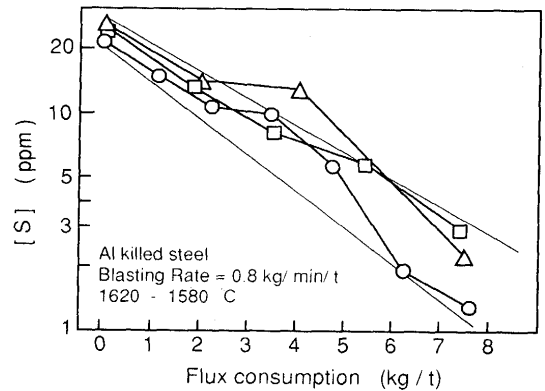


Fig. 3.11. Change in sulfur content in molten steel during powder top blasting treatment for desulfurization at the RH degasser. (CAMP-ISIJ, 5 (1992), p. 1238)

また、真空槽内に付着した地金が溶鋼中に溶解あるいは落下し脱炭速度低下の原因となる問題が指摘された。これを回避するために、ガスバーナーで真空槽耐火物を加熱し地金を溶解したり、処理中に付着しにくくする設備が開発された(RH 多目的バーナー)。

極低硫鋼溶製の新技术として、真空槽内の羽口からフラックスインジェクション(FI)を行うRH-FI法、あるいはRH-PB法(1986年)や、真空槽内に設置したランスから粉体を溶鋼表面に吹き付ける脱硫技術(1992年)が開発された(Fig. 3.11)。また、一方では従来のFI技術を発展させ、FIを減圧タンク内で行うV-KIP法(1986年)も開発された。

これらの真空処理設備を利用した脱硫処理技術の開発により、従来は経済的に溶製することが困難であった極低炭素濃度かつ極低硫濃度溶鋼の要求にも対応できるようになりつつある。

低窒素化技術には、工業的には大きな技術発展はなかったが、出鋼時の窒素吸収防止、還元ガスによるRHでの脱窒の可能性を探索した実験、RH浸漬管からの空気侵入を防止するシール技術などの研究が継続され、一部実用化されつつある。基礎研究として、フラックスによる脱窒が提案され、各種スラグ系のナイトライドキャパシティが報告された。また、RH槽内へのフラックス添加による脱窒実験が行われたが、いまだ工程の技術としては確立していない。

ステンレス鋼の高純度化技術について簡単に触れる。極低炭、低窒素のフェライト系ステンレス鋼は、従来VODでの強攪拌によって溶製されていた(SS-VOD法)。これに加え、粉体を溶鋼表面に吹き付けることにより浴面下でのCOガス発生を活発化し、脱炭・脱窒速度を向上する技術が提案された(VOD-PB法)。

含クロム溶湯の脱磷精錬は困難であることは前述したが、この10年間にCaO系フラックスを用いた酸化脱磷処理の工業規模での実験が行われ、低[P]含クロム溶銑( $[\%P] < 0.02$ )を得られるようになった。

### (3) 高品質鋼精錬技術の今後の課題

この10年間の精錬技術の流れを一言で言えば、高純度化・高潔浄度化の要請に応えるため、各反応容器の精錬機能を分化し、それぞれの精錬反応に対し熱力学的に有利な条件を作り、溶湯の強力な攪拌により反応速度を増加することに注力されてきたと言える。しかし、さらなる精錬機能の分化は、工程の複雑化とこれに伴う溶製時間の長時間化、溶製コストの増加などの弊害をもたらすことが予測される。

この状況に対応し、今後は一つの精錬容器内で同時に、あるいは時間をずらして異なる精錬反応を進める技術開発が検討されることだろう。すでに、転炉を用いた溶銑予備処理プロセスでは、CaO系フラックスによる溶銑脱磷に引き続き、ソーダ灰を用いた溶銑脱硫を同じ反応容器で実施する例や、RH設備を脱ガス、脱炭、脱酸の従来機能に加え溶鋼脱硫までの機能を持たせる技術開発などの例も見られる。高品質の

製品を得る目的は変わらないまでも、今後は、なるべく少ない工程で、熱力学的には相反する精錬反応を効率よく行うような精錬機能の集約も一つの方向になると思われる。

溶鋼の高純度化・高潔浄度化は、精錬技術開発の永遠の課題である。ただし、工業規模で実施することを念頭に、経済性を考慮した設備と手法を選択しなければならないのは言うまでもない。さらに、すべての鋼種を高純度・高潔浄度を前提に大量に溶製する技術開発を行うのではなく、必要な程度までの不純物除去を必要な量に対して実施できるような精錬プロセスの再構築も求められる。また同時に、精錬結果のばらつきを小さくする努力も引き続き重要である。

### 3.2.3 高品質鋼連鑄技術の進歩と今後の課題

鉄鋼製品品質に対するユーザーの要求が厳しくなり、一方では、連鑄-熱間圧延工程の直結化が望まれている。こうしたニーズに応えるには、連鑄鑄片の表面、内部欠陥を低減し、鑄片の無手入れ化を達成する技術開発が必要となる。以下、高品質鋼連鑄技術のこの10年間の動きについて解説する。

#### (1) タンディッシュメタラジ

##### —溶鋼分配装置から精錬装置へ—

連鑄タンディッシュに求められる役割は、清浄な溶鋼を均一な温度で鑄型に供給することにある。そのため、タンディッシュには、(i)介在物の浮上分離、溶鋼の再酸化防止といった溶鋼の清浄化機能と、(ii)溶鋼加熱などの手段による溶鋼温度の均一化機能が求められる。

##### (i) 溶鋼の清浄化機能

定常部、非定常部の溶鋼の清浄化を図るには、溶鋼中の介在物浮上分離を促進するタンディッシュ形状を選定する必要がある。そのため、(イ)溶鋼の滞留時間を確保すべく、1ストランドで80t容量の大型タンディッシュが登場し、また(ロ)2鍋同時注入が可能で、2槽構造を有したH型タンディッシュが実用化されるに至った。H型タンディッシュの概略をFig. 3.12に示す。H型タンディッシュは取鍋交換時のタンディッシュスラグの巻き込み防止、取鍋スラグの流入防止に効果のあることが報告されている。

さらに、タンディッシュ内溶鋼を回転磁界により攪拌し、

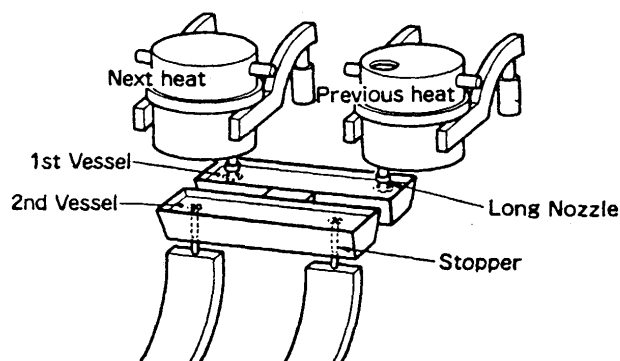


Fig. 3.12. Schematic view of [H-TD] casting process. (CAMP-ISIJ, 4 (1991), p. 1200)