

加減圧精錬法による清浄鋼の製造

Production of Clean Steel by Pressure Elevating and Reducing Method

NKK京浜製鉄所

新井 学*・渡辺恭二

総合材料技術研究所

沖本伸一・中島廣久

松野英寿・菊地良輝

1. 緒言

近年、鋼の清浄性に対する要求はますます高まっている。鋼からのミクロンサイズの微小介在物の除去が耐疲労、耐腐食などの鋼品質特性を改善するために必要となっている。一方、生産量の拡大に伴って処理時間の短縮などの製造上のニーズも大きくなっている。

これらの要求を満足するために、当社はアルゴンガスバブリングのような従来技術とは異なる、微小介在物の効率的で迅速な除去を目的とした加減圧精錬法 (Pressure Elevating and Reducing Method、以下、図表中PERMと称す) の開発を推進してきた。

加減圧精錬法は、最初に可溶性ガスを大量に溶鋼中に吹き込んで溶解させた後、急速に減圧して脱ガスすることにより、溶鋼中から生成した微細気泡で介在物をトラップし浮上除去する方法であり、基礎実験によりその効果が確認されている。^{1)・2)} 本報では、当所50Ton VODおよび250Ton RHへの適用試験の結果について報告する。

2. 加減圧精錬法の原理

本法の原理イメージをFig. 1に示す。本法は以下の3段階より構成される。

- 1) 可溶性ガスを溶鋼に強制溶解させる。
- 2) 可溶性ガスを過飽和状態にするために急速に減圧する。
減圧中、ガス気泡の一部は懸濁介在物を核として発生する。
- 3) ガス気泡に伴われた介在物は浮力が増加するために溶鋼から速やかに分離される。

この加減圧精錬法の基礎実験を実施した結果、溶鋼からの微小介在物除去の効率がアルゴンバブリングのような従来方法と比較して向上することが確認された。

そこで、この結果に基づき、当所50Ton VODおよび250Ton RHにおいて実機試験を実施した。

なお、可溶性ガスとしては窒素ガスを使用した。

3. 50Ton VODにおける実機試験

3.1 試験方法

Table 1に試験条件を示す。またFig. 2に炭素 Fig.2 Experimental method (Carbon steel)

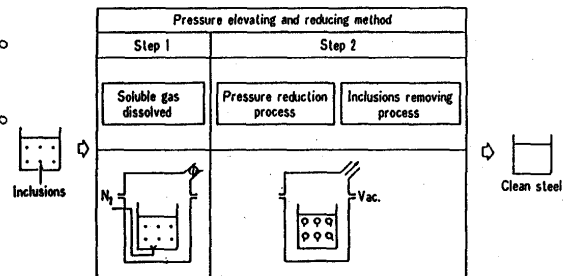
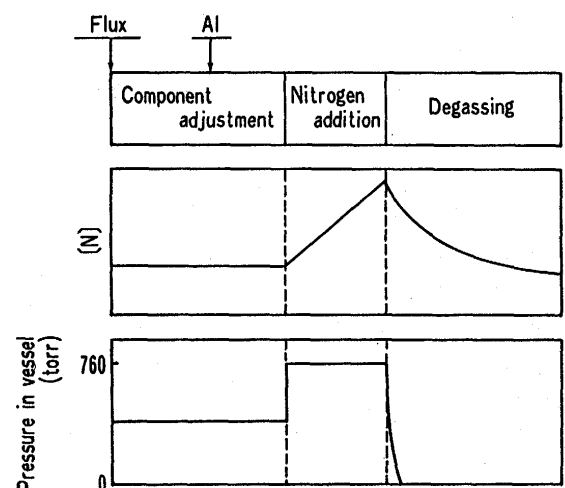


Fig.1 Principle of PERM

Table1 Experimental condition (VOD)

	Carbon steel	SUS 316L
Heat size (ton)	50	50
Deoxidation method	Al-killed	Slag control
Flux	CaO-Al ₂ O ₃	CaO-CaF ₂ -SiO ₂
Initial (N) content (ppm)	Gas bubbling	≤60
	New method	200~400
Ar flow rate (Nl/min)	100~200	1000~1500
Experimental pressure (torr)	30~150	30~150
	≤1	≤1



鋼、Fig. 3にステンレス鋼に対する試験方法の概略を示す。炭素鋼は低炭、中炭アルミキルド鋼を対象としてVADにて造滓、成分調整後、VODにて初期窒素濃度100~200ppmまで加窒し、その後、急速減圧しながら処理前後および途中のサンプリングを実施した。ステンレス鋼はSUS316Lのスラグ脱酸材を対象とした。VODにて脱炭還元後加窒し、一旦除滓した後に新たにCaO-CaF₂系フラックスを添加、造滓し急速脱ガスを実施した。なお、初期窒素濃度は1000~1500ppmとした。

3.2 試験結果

1) 炭素鋼への適用

Fig. 4に加減圧精錬法と比較材としての従来アルゴンバブリング法の脱酸挙動の一例を示す。加減圧精錬法の場合、鋼中トータル酸素は短時間で7ppmまで到達し、脱酸速度は従来よりも速くなっている。とくに窒素ガスの発生の激しい脱酸初期のトータル酸素の減少速度が大きく、加減圧精錬法の効果が顕著に現れている。

2) ステンレス鋼への適用

Fig. 5に加減圧精錬法と従来アルゴンバブリング法の脱酸挙動の一例を示す。加減圧精錬法の方がトータル酸素の減少速度が大きく、到達レベルも低い。

4. 250Ton RHにおける実機試験

4.1 試験方法

試験方法の概略を通常処理と比較してFig. 6に、試験条件をTable 2に示す。試験のプロセスは転炉→NK-AP→RHであり、試験ヒートの一部は出鋼後にスラグドラッガーにより除滓を実施した。取鍋は耐火物からの酸素供給を低減するためにアルミナスピネルを流し込んだものを使用した。スラグドラッガーにより除滓を実施した後、NK-APにてCaO-CaF₂-Al₂O₃系スラグを造滓するか、またはスラグ脱酸を実施してトップスラグの影響の除去およびトータル酸素の低減を図った。RH到着窒素濃度は150~400ppmとなるようにNK-APにてインジェクションランスと取鍋底部のポーラスプラグから溶鋼中に窒素を添加した。その後、RHにおいて真空度を処理開始後5分以内に1torr以下まで低減し、環流用アルゴンガスを最大3000Nl/分吹き込むことによって急速脱窒を実施した。そして溶鋼中よりサンプルをRH処理前後および処理中に採取した。なお、真空槽内付着地金の再溶解の影響を低減するために、これを酸素雰囲気中で溶解除去しウォッシング処理を行なった後に本試験を実施した。処理時間はNK-APが約80分、RHが約40分である。

また、同様の試験を極低酸素鋼である軸受鋼で実施した。

4.2 試験結果

1) 脱酸挙動

脱酸挙動の一例を通常操業と比較してFig. 7に示す。

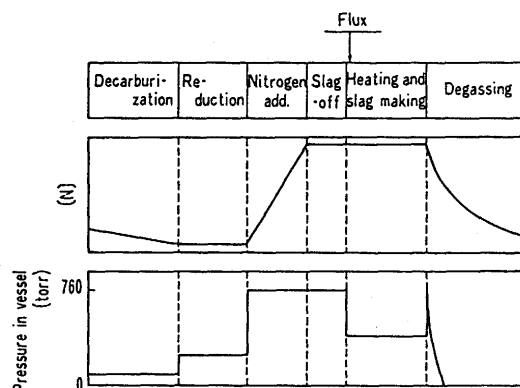


Fig.3 Experimental method (SUS)

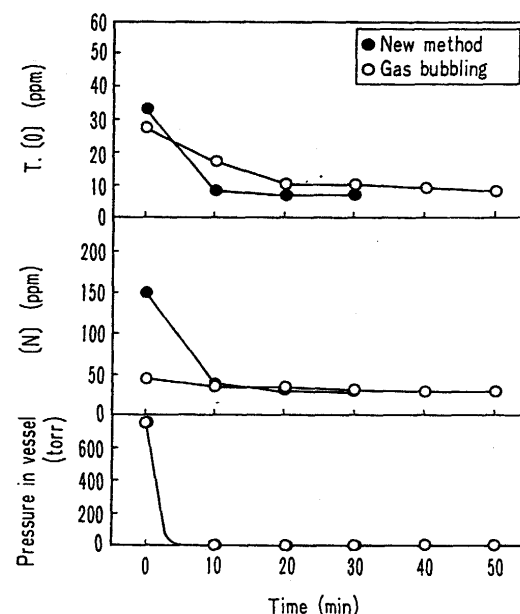


Fig.4 Experimental result (Carbon steel)

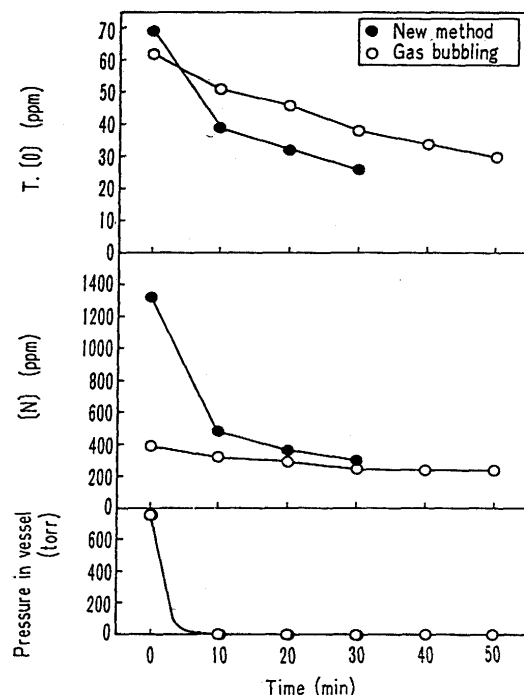


Fig.5 Experimental result (SUS)

加減圧精錬法による溶鋼中トータル酸素の到達レベルは通常処理のそれよりも低い値となっており、脱酸速度も大きくなっている。脱酸速度は窒素ガスが大量に発生する初期の段階で特に大きく、トータル酸素はRH処理前の20~30ppmから処理開始後20分で約10ppmまで低減しており、加減圧精錬法は迅速脱酸プロセスとして有効であると考えられる。

2) 軸受鋼への適用

本試験によって製造された軸受鋼のビレット中のトータル酸素分布を通常処理の結果と比較してFig. 8に示す。加減圧精錬法を実施することによって7ppm以上の出現頻度が減少する一方、4ppmの出現頻度が増加している。結果として、本試験の平均トータル酸素は通常処理のそれよりも約0.7ppm低減している。

また、本試験によって製造されたビレット中の介在物個数分布を粒径毎に通常処理の結果と比較してFig. 9に示す。介在物個数分布は、250gのサンプルを酸で溶解後、残渣をメタノール中に分散させた状態でレーザー光を照射した際に得られる光回折強度分布より粒径分布を求める光散乱法³⁾によって得た。本試験の介在物平均粒径は通常処理のそれよりも小さくなっており、粒径10 μ m以上の介在物は皆無となっている。

5. 考察

本試験および通常処理の脱酸挙動を(1)式で求められる見掛けの脱酸速度定数 K_o で整理し、基礎実験である1.5kgVIFおよび70kgVIF試験の結果と共にTable 3に示す。加減圧精錬法の方が高い見掛けの脱酸速度定数が得られ、通常処理に対する脱酸速度定数の増加割合($K_{o,1}/K_{o,0}$)は2.0~2.3倍であった。

$$d[O]/dt = -K_o([O] - [O]_e) \quad (1)$$

K_o : 見掛けの脱酸速度定数 [min^{-1}]

$[O]_e$: 平衡酸素濃度 [ppm]

またガスによる攪拌エネルギー密度 $\dot{\epsilon}$ と見掛けの脱酸速度定数 K_o の関係を試験と通常処理で比較して基礎実験の結果と共にFig. 10に示す。攪拌エネルギー密度は発生する窒素ガスも考慮に入れて(2)式のSundbergの式⁴⁾で算出した。この式においてRHの場合の溶鋼量 W は真空槽内のみの量とした。

$$\dot{\epsilon} = 0.00618QT/W[(1-273/T) + \ln(1+Z/148P)] \quad (2)$$

$\dot{\epsilon}$: 攪拌エネルギー密度 [watt/t]

Q : ガス流量 [Nl/min] ($10^{-3}\text{Nm}^3/\text{min}$)

T : 温度 [K]

W : 溶鋼量 [t]

Z : 溶鋼表面からのガス吹き込み位置の深さ [cm]

P : 雰囲気圧力 [atm] ($1.01 \times 10^5 \text{Pa}$)

図より攪拌エネルギー密度と見掛けの脱酸速度定数の間には正の相関関係があり、加減圧精錬法の見掛けの脱酸速度定数は通常の攪拌エネルギー密度依存性よりも増加して

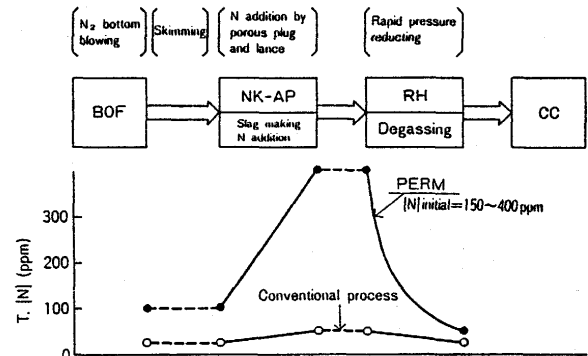


Fig.6 Experimental method (RH)

Table2 Experimental condition (RH)

Steel grade		Medium-high carbon Al Killed steel
Heat size		250ton/heat
Ladle refractory		High Al ₂ O ₃ castable
Deoxidation method		Al deoxidation
Slag composition		CaO-CaF ₂ -Al ₂ O ₃
Initial [N] content	PERM	150~400ppm
	Conventional	≤60ppm
Circulation Ar flow rate		3000Nl/minute
Vacuum degree		≤1Torr
Temperature		1500~1630°C

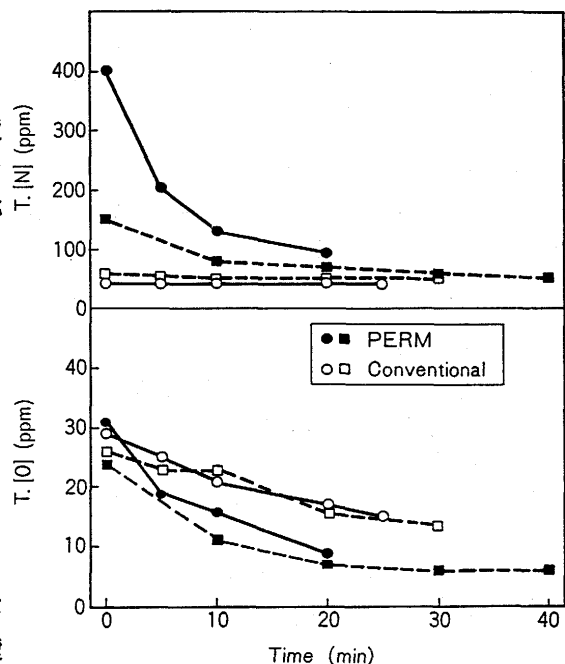


Fig.7 Experimental result (RH)

いることがわかる。この結果より加減圧精錬法においてはガス攪拌の効果以外に窒素ガス発生による介在物浮上促進効果が働いているものと考えられる。しかしながら、RHにおける見掛けの脱酸速度定数の攪拌エネルギー密度依存性からの増加割合はVIFおよびVODのそれよりも小さくなっている。

RHにおける介在物除去機構をFig. 11に示す。取鍋および槽内で溶鋼が環流する間の介在物の凝集体による浮力増大の効果、または環流用アルゴン気泡へ介在物が吸着されて真空槽内で一旦浮上した後、溶鋼表面で介在物が凝集することによる浮力増大の効果により懸濁している介在物の除去が促進されるものと推定される。加減圧精錬法の場合はアルゴン気泡の他に窒素気泡が発生するため上述した内の後者の効果が增加する。RHにおける見掛けの脱酸速度定数の攪拌エネルギー密度依存性からの増加割合がVIFおよびVODのそれよりも小さくなっているのは真空槽内で浮上した介在物が取鍋内に入った際に、サイズの小さいものは再懸濁してしまうためであると考えられる。

6. 結言

加減圧精錬法の50Ton VODおよび250Ton RHへの適用試験を実施し、その効果を調査した。その結果、加減圧精錬法における脱酸速度は通常処理と比較して2倍以上に向上して鋳片中トータル酸素および介在物平均粒径が低減することが確認された。可溶性ガスを溶解させた後急速減圧し、浴中から介在物を核として大量のガスを発生させ介在物を浮上分離させる本プロセスは、介在物の迅速除去による清浄鋼溶製に有効である。

<参考文献>

- 1) 松野ら; 材料とプロセス, 3 (1990) 246
- 2) 菊地ら; 材料とプロセス, 3 (1990) 1194
- 3) 千野ら; 材料とプロセス, 4 (1991) 387
- 4) Y. Sundberg; Scand. J. Metallurgy, 7 (1978) 81

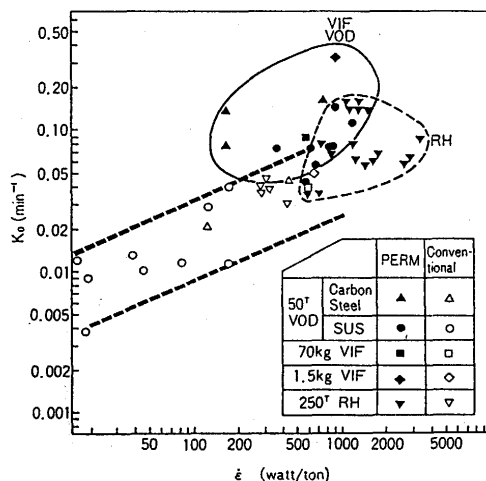


Fig.10 Relation between $\dot{\epsilon}$ and K_d

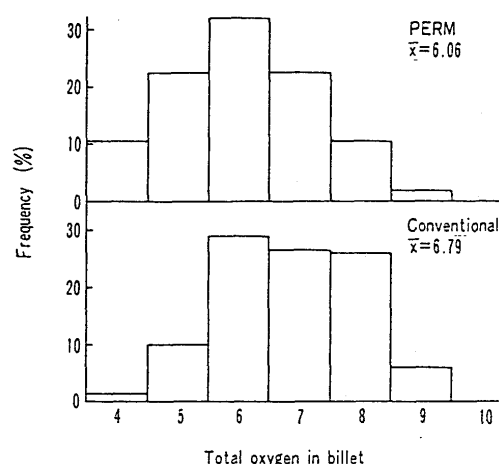


Fig.8 Distribution of total oxygen in billet

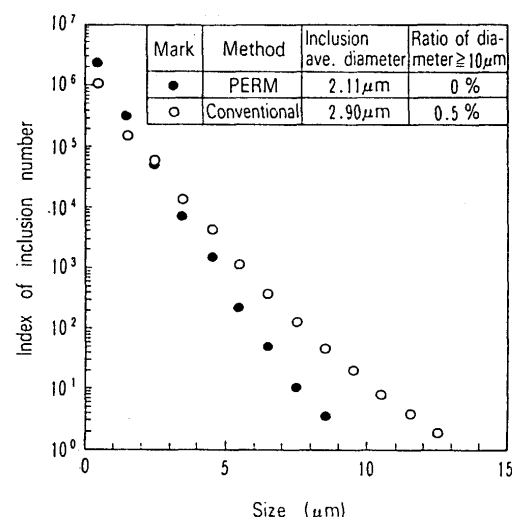


Fig.9 Distribution of inclusion number

Table3 Deoxidation rate constant K_d

	1.5kg VIF	70kg VIF	50t VOD	250t RH
PERM $K_{d,1}$	0.34	0.09	0.10	0.09
Conventional $K_{d,0}$	0.06	0.04	0.05	0.04
$K_{d,1}/K_{d,0}$	5.7	2.3	2.0	2.3

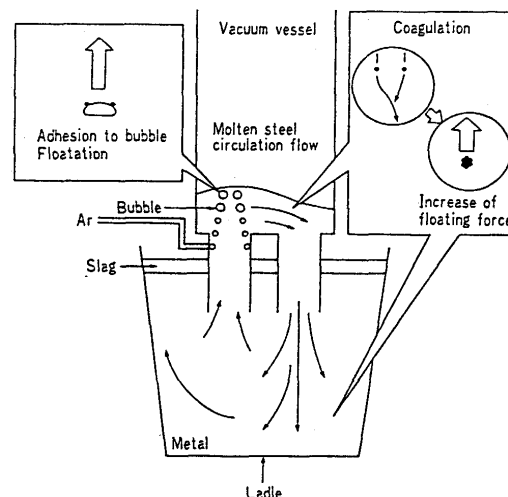


Fig.11 Concept of inclusion removal