

飯田 義治* 江本 寛治** 小川 正勝*** 増田 康男**** 大西 正之***** 山田 博右*****

Fully Automatic Blowing Technique for Basic Oxygen Steelmaking Furnace

Yoshiharu Iida, Kanji Emoto, Masakatsu Ogawa, Yasuo Masuda, Masayuki Onishi, Hirotsuke Yamada

要旨

炭素含有量と温度に関する転炉終点制御精度の向上と、
 磷含有量の制御のために、滓化制御技術の開発が要請され、
 水島製鉄所では、吹錬中のランスの振動加速度からスラグ
 フォーミング(foaming)高さを連続的に検知し、かつ制御
 する技術を開発した。さらに、コンピューターを用いたプ
 ログラム吹錬、およびサブランスによる終点制御技術と組
 合わせて、吹錬を完全に自動化した。このシステムにより、
 吹止の炭素含有量と温度の同時的中率や出鋼歩留の向上、
 再吹錬率の低減、炉寿命の延長を実現した。

Synopsis:

An innovative technique has been sought for slag formation control in LD converter in order not only to obtain a perfect simultaneous hitting of aimed carbon content and bath temperature but also to control phosphorus content at turn down.

The acceleration of oxygen lance vibration is found to be correlated with slag foaming height in the vessel.

Through the introduction of continuous monitoring of the acceleration into existing programmed and dynamic control subsystems, a fully automatic blowing system has been established.

Due to this innovation, significant benefits such as improvement in hitting ratio and yield of steel, reduction in reblowing ratio and prolongation of refractory life have been achieved.

1. 緒 言

純酸素上吹き転炉が、その高生産性と秀れた品質によって製鋼法の主流を占めるようになってから、すでに20年余りが経過した。この転炉製鋼法は、その特徴である高速吹錬のために、逆に、吹止め(吹錬終点)における炭素含有量、溶鋼温度、およびP含有量を所定の日標値に同時的中させることが難しいという難点も有していた。

このうち、炭素含有量、溶鋼温度の制御については、サブランスを用いたダイナミック制御技術の開発によりその的中率は80%へ到達した。しかし、90%以上の的中率を得るため、およびP含有量を制御するためにスラグの制御が課題として残されていた。この課題に対して、吹錬用ランスが滓化に対応して振動することに着目し、ランスの振動を測定することにより滓化状況を連続的に検知し、かつ制御するシステムを確立し、その結果、吹錬を完全に自動化した。

2. 吹錬制御技術の開発経緯

Fig. 1に、当社の吹錬制御技術の開発経緯を示す。炭素含有量と溶鋼温度の的中のため、転炉導入の初期から物質収支、熱収支にもとづくスタティック制御モデルをつくり、計算機制御を実施してきた¹⁾。スタティック制御は、吹錬の初期条件によってのみ操作量を決めるため、終点制御精度には限界があった。この欠点を補うために、転炉排ガス分析を利用したダイナミック制御技術の開発を進めたが、間接測定であるため、精度に限界

があった。また、温度測定は、別の手段、例えば、投げこみ式温度計²⁾によらなければならない欠点があった。しかし、投げこみ式温度計は信頼性も乏しく、長らく炭素含有量と溶鋼温度の的中率は45~50%と停滞していた。

この壁を打破するために、吹錬中に炉内溶鋼の直接サンプリングと测温を可能とする全自動サブランスを1974年6月に設置した。測定プローブの開発およびダイナミック制御モデルの改良によって、炭素濃度、溶鋼温度の同時的中率は80%に達した³⁾。しかし、滓化のばらつきが吹錬末期の酸素効率をばらつかせ、90%以上の同時的中率を得ることは困難であった。しかも、高級鋼の増加に伴って、脱磷制御のニーズも高まり、滓化制御技術開発が急務になった。

音響測定または炉体の振動測定によりスラグフォーミング

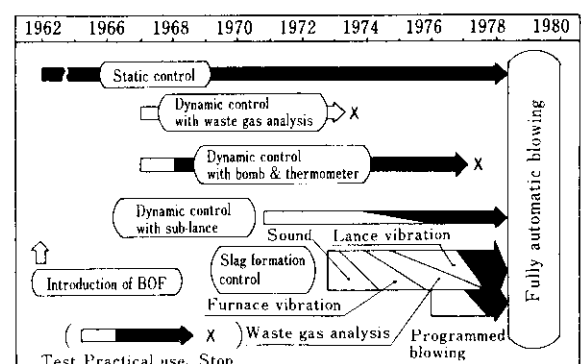


Fig. 1 Development of blowing control technique in BOF

* 技術本部製鋼・鋼材技術部長・工博
 *** 水島製鉄所システム制御技術室主査(課長)
 ***** 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(課長)
 (昭和58年2月14日受付)

** 水島製鉄所管理部主査(部長補)
 **** ツバロプロジェクト協力本部プラント建設部計測設備班主査(班長)
 ***** 水島製鉄所製鋼部第1製鋼課長

(foaming, 泡立ち) 高さを推定する方法, 排ガス分析によりスラグ酸化度を推定する方法等を試みたが, 精度と応答速度に問題があった。

そこで, 炉内反応の再現性を高める目的で, 吹錬を基準化するプログラム吹錬を実施した。これは, 溶銑率, 溶銑の化学成分と温度といった初期条件, および吹止目標温度, 炭素含有量, P 含有量等の終点条件の組合わせにより, 吹錬プログラムを選択すれば, 吹錬開始から吹止までのランス高さ調整, 送酸速度調整, 副原料投入を自動的に行うものである。しかしながら, 初期条件, 終点条件, 吹錬プログラムを同一にして吹錬を実施しても, 滓化状況は必ずしも一定ではなく, 吹錬途中でのオペレーターによる手動介入を皆無にはできなかった。その間並行して進めていた, 吹錬用ランスの振動からスラグフォーミング高さを連続的に推定する技術を確立し, この技術とプログラム吹錬と組合わせて, 吹錬開始から吹止までの全自動吹錬システムを完成した。

3. 全自動吹錬制御システムの構成

全自動吹錬制御システムは, Fig. 2 に示すように①～④のサブシステム群から構成される。

①: スタティック制御サブシステム

反応に関連する物質収支, 熱収支にもとづくスタティック制御モデルにより, 原料配合, および吹錬に必要な酸素, 冷却材, 副原料の量を計算する。

②: プログラム制御サブシステム

吹錬前に選択された吹錬プログラムにしたがって, ランス高さ, 送酸速度を自動制御し, 副原料を自動投入する。また, 排ガス設備の運転制御, ガス回収操作, サブランスの起動制御を行う。

③: 滓化制御サブシステム

ランス振動加速度測定値をもとに, 滓化状況を連続的に検知し, かつ, ランス高さおよび送酸速度を制御する。

④: サブランスによるダイナミック制御サブシステム

サブシステムにより, 吹錬中の溶鋼温度, 炭素含有量を測定し, ダイナミック制御モデルにより, 必要な酸素および冷

却材の量を算出して, 冷却材の投入と吹錬停止を自動的に行う。

②のプログラム吹錬制御の仕様を, Table 1 に示す。吹錬初期条件 (溶銑配合, 溶銑の温度と組成, 炉況等) と吹錬終点条件 (吹止目標温度, 組成) により吹錬パターンを選択すれば, Fig. 3 に例を示すように吹錬が自動的に進行する。つまり, プログラム吹錬は, 一種のスタティック制御である。③のサブシステムは, スラグフォーミング高さをダイナミックに制御するもので, 理想のスラグフォーミング高さになるように, ②の吹錬パターンを自動的に修正する。

Table 1 Specification of programmed blowing

Item	Specifications
Number of blowing patterns	15 patterns (Combination of L.H. and F_{O_2})
Range of L.H. and F_{O_2}	L.H. : 1.1~2.65 m (Pitch : 0.05 m) F_{O_2} : 450~800 Nm ³ /min (Pitch 50 Nm ³ /min) Bias can be added to L.H.
Number of flux charging patterns	Lime and dolomitic lime : 5 patterns Iron ore : 4 patterns Time of charging start and interval of charging are determined with computer

L.H. : Lance height F_{O_2} : Oxygen flow rate

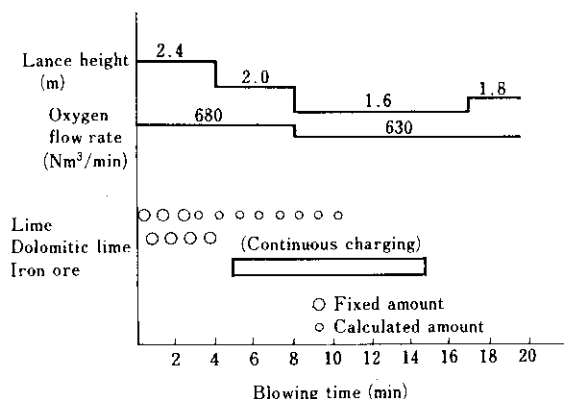


Fig. 3 An example of blowing pattern by program control (Mizushima No. 2 BOF)

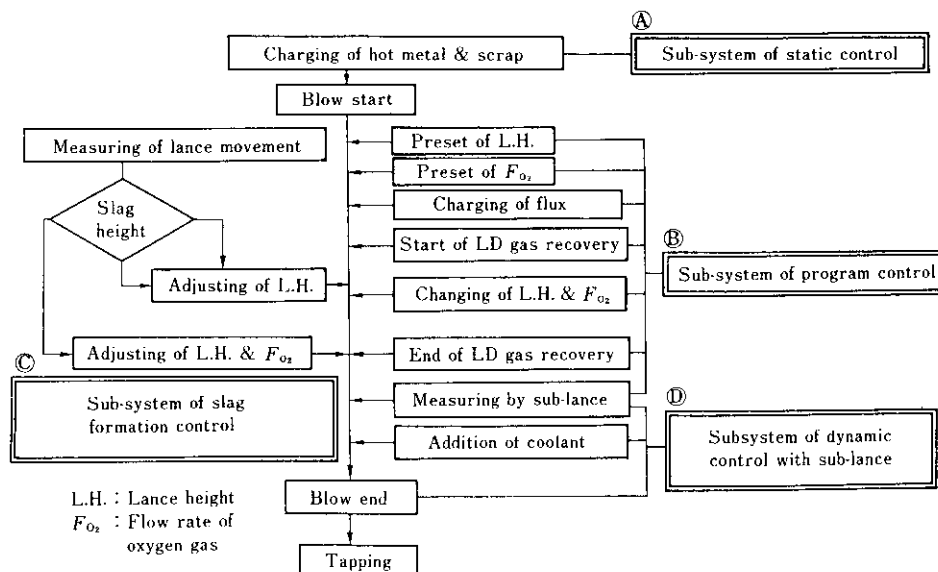


Fig. 2 Systems and functions of fully automatic blowing

4. ランス振動測定による滓化制御システム

4.1 滓化検知の基本原則

吹錬によって、炉内では約80～120 kg/t-steelのスラグが形成され、脱炭反応で発生するCOガスによってフォーミング(泡立ち)する。滓化が不良の時は、スラグは反応性の乏しい硬いスラグとなり、フォーミングしない。逆に、流動性を有しても、その適正を欠くと過度のフォーミング現象を生じ、ついには炉口からスラグが溢出するスロッピング現象を生じる。

Fig. 4に示すように、スラグがフォーミングしてランスにまで到達すると、ランスがスラグの運動エネルギーを受けて振動するが、その振動の強さからスラグフォーミング高さを推定できることを見出した。

4.2 ランス振動測定装置

Fig. 5に滓化制御の機器構成を示す。ランスはワイヤーで懸架されており、ランス・クランプ装置を支点として振動可能である。ランス本体の固有振動数は低いので、低い周波数の加速度変化の測定に有利な、水晶発振加速度計を採用した。ランスの振動方向は常に一定しているわけではなく、吹錬中、徐々にその振動方向が変化するので、加速度計を直角二方向に配置し、合成加速度を算出した。

実操業で得られたランス振動加速度計からの出力波形をFig. 6にこれらの信号波形の周波数スペクトルをFig. 7に示す。周波数解析結果は、ランスの固有振動数の0.39Hzの近傍にピークを有し、またスラグフォーミング高さが高くなるにしたがって、どの周波数でもスペクトル強度が強くなることを示している。

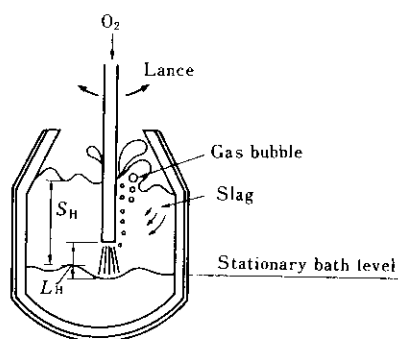


Fig. 4 Schema of lance vibration

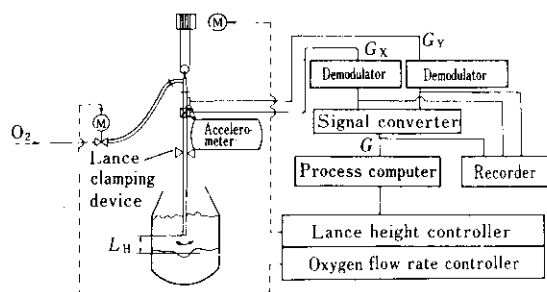


Fig. 5 System of slag formation control

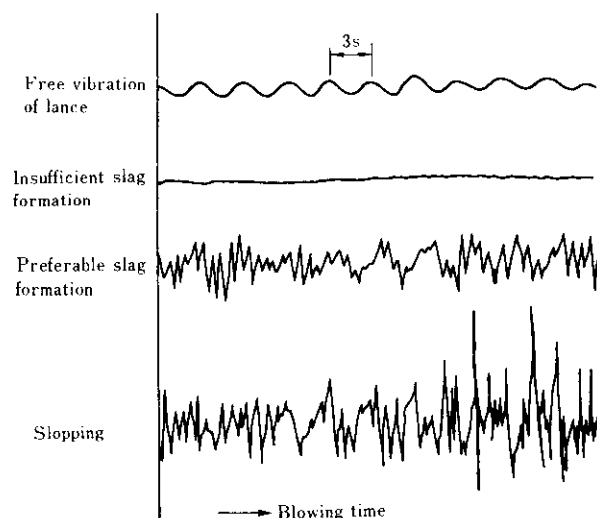


Fig. 6 An example of output signal of accelerometer

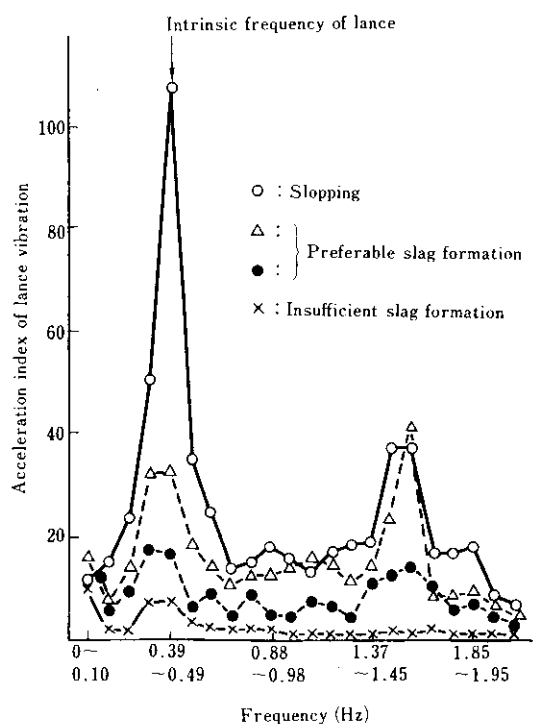


Fig. 7 Spectrum of lance vibration

4.3 ランス振動とスラグフォーミング高さ

特別に製作した湯面測定用プローブを装着したサブランスを用いて、吹錬中、スラグフォーミング高さを間欠的に測定し、ランス振動加速度との対応を取り解析した結果をFig. 8(a)に示す。送酸速度、ランスのスラグ中への浸漬深さとランス振動加速度 G との間に、(1)式の関係を見出した。

$$G = aF_{O_2} (S_H - L_H) + b \quad (1)$$

G : ランス振動加速度 (cm/s^2)

F_{O_2} : 送酸速度 (Nm^3/min)

S_H : スラグフォーミング高さ (m)

L_H : ランス高さ (m)

a, b : 定数

(1)式の妥当性を検証するために、250 t 転がりの1/10模型を用い

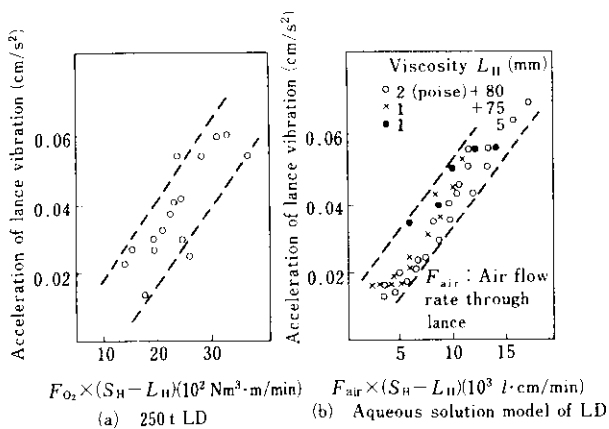


Fig. 8 Relation between acceleration of lance vibration and foaming slag height above lance nozzle

て、水モデル実験を行った。石けんの水溶液とポリエチレンオキサイド（増粘剤）からなる発泡性液体を用い、実転炉と同じく、4孔ランスから空気を噴射した。Fig. 8(b)にその実験結果を示したが、(1)式によく似たことが確認できた。

一般に、流体の中におかれた円柱が受ける力は、(2)式で表される⁴⁾。

$$F \propto D \cdot L \cdot C_D \left(\frac{1}{2} \rho_s \cdot U^2 \right) \quad (2)$$

D : 円柱径 L : 円柱浸漬深さ
 C_D : 抵抗係数 U : 液体の流速
 ρ_s : 液体の密度

(2)式を転炉内の現象として考えれば、抵抗係数 C_D はスラグの物性により変化するが、異常な塩基度でない限り、ほぼ一定値をとると考えてよい。スラグの揺動エネルギーである $\frac{1}{2} \rho_s \cdot U^2$ は、上昇するガスから与えられる運動エネルギーの位置的な片寄りに関係するが、発生するCOガス量が多いほど大きいと考えられる。最も簡単に、送酸速度 F_{O_2} と比例関係にあると見なせば、 $L = S_H - L_H$ であるから、実験式(1)が裏付けられる。

4.4 滓化制御技術

滓化制御は、スラグフォーミング高さが適正域からずれた時、ランス高さまたは送酸速度を修正して、スロッピングを防止し、スラグフォーミング高さを常に良好に維持することを基本的なねらいとしている。Fig. 5に示したように、独立に測定された水平直角二方向のランス振動加速度 G_x , G_y をベクトル加算して

得られた G とランス高さ L_H および送酸速度 F_{O_2} が、プロセスコンピューターに時々刻々入力され、(1)式を変換した(3)式により、スラグフォーミング高さ S_H が連続的に算出される。

$$S_H = \frac{G-b}{aF_{O_2}} + L_H + B_H \quad (3)$$

B_H : 炉底高さ修正項

実炉においては、炉底耐火物の溶損あるいはスラグの付着により炉底高さが変動するので、炉底高さ修正項も(3)式に組込んでいる。

Fig. 9に、 S_H の値に応じて選択されるランク別滓化制御の概念を示す。判定が「Good」の場合は、プログラムどおりの吹錬パターンを継続し、その他の判定の場合は、ソフトブロー、あるいはハードブロー側に吹錬プログラムを修正し、その後「Good」判定になれば、もとの吹錬プログラムにもどす。

各ランクの境界値は、脱磷成績を評価指数として経験的に求めたが、スロッピング領域下限高さについては、サブランスを用いて実測して定めた。

滓化制御操作後の炉内反応の追従は数十秒の遅れをもっているため、Fig. 10の制御ロジックの例に示したように、一種の可変周期サンプリング制御を採用している。Fig. 11に、水島製鉄所第2製鋼工場250t転炉において実施した、滓化制御の実施例を示す。矢印の時点で調節制御が行われている。

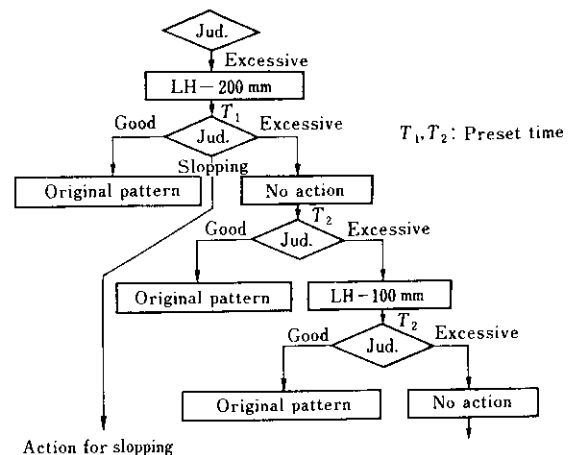


Fig. 10 An example of slag formation control program (When judgement is "excessive")

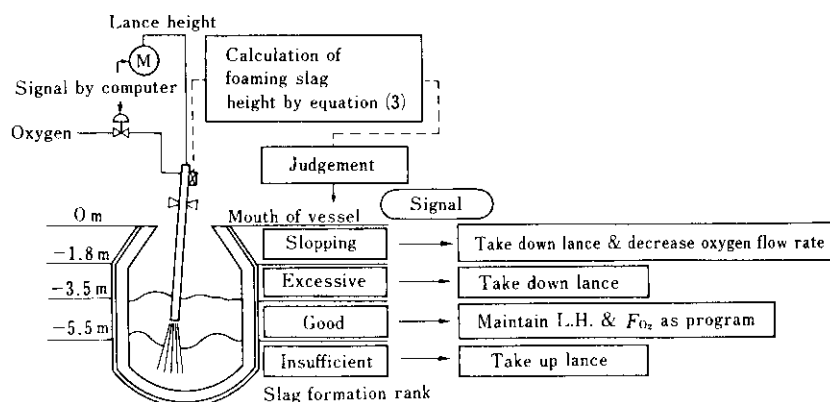


Fig. 9 Principle of slag formation control

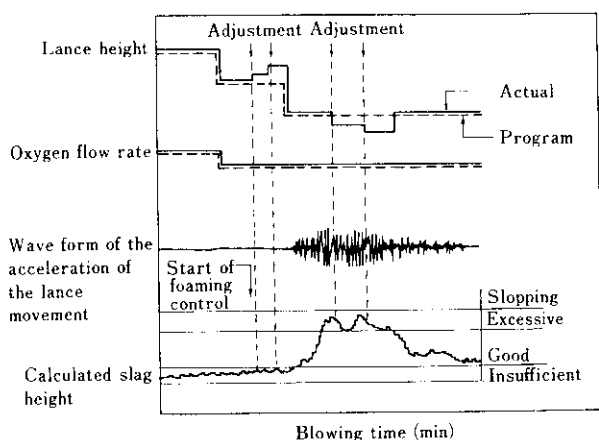


Fig. 11 An example of automatic blowing

4.5 スラグフォーミング高さと脱磷

物理的挙動であるスラグフォーミング現象の、化学反応である脱磷を制御する指標としての適否を、検証するために、250t転炉のスラグフォーミング高さと吹止〔P〕の関係を調査した。Fig. 12に示すように、スラグフォーミング高さの時間累積値が高いほど、脱磷が促進されており、スラグフォーミング高さを、スラグの脱磷能力を示す指標として適用し得ることが確認できた。

5. 全自動吹錬制御システムの機器構成

Fig. 13に全自動吹錬制御システムの機器構成を示した。吹錬プログラムを選択し吹錬を開始すれば、吹錬終了までの全操作がFig. 2に示した①、②、③のサブシステムにしたがって、転炉プロセスコンピューターからプラント制御機器への直接出力によって行われる。さらに、④の滓化制御サブシステムによって、ランス高さおよび送酸速度を修正しながら、吹錬が全自動で進行する。

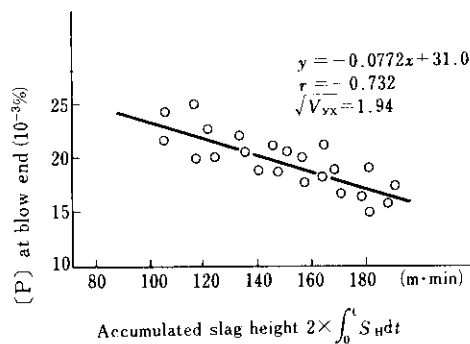


Fig. 12 Relation between foaming slag height and [P] at blow end

6. 全自動吹錬結果

全自動吹錬の成果を、水島製鉄所第2製鋼工場を例にとって述べる。Fig. 14に吹錬成績の推移を示すが、吹止炭素含有量・温度同時の中率は95%に達し、再吹錬率も著しく低下した。この

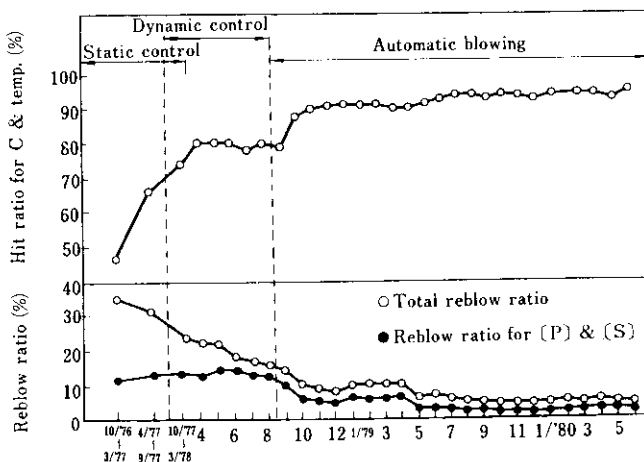


Fig. 14 Improvement of blowing performance at No. 2 BOF

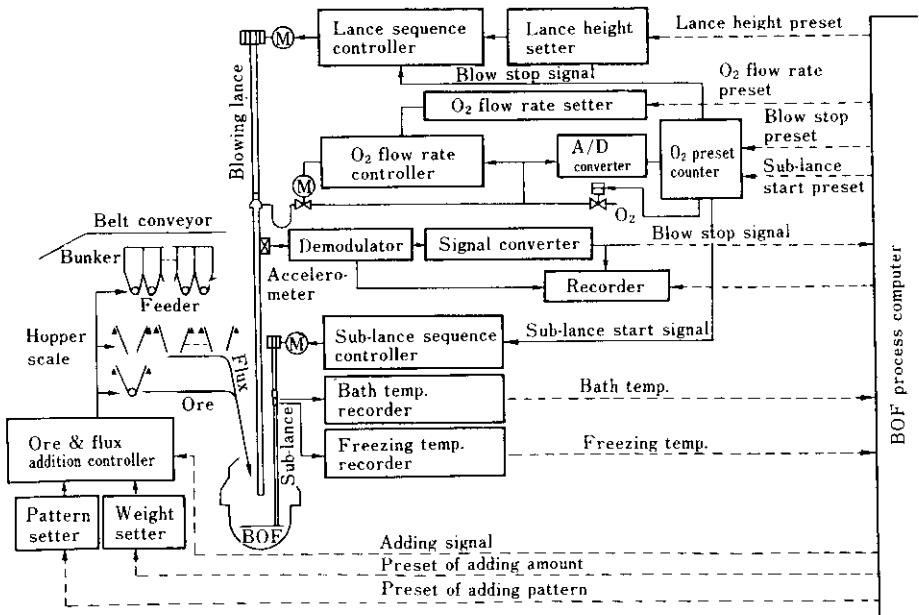


Fig. 13 Hardware of fully automatic blowing system

結果、吹止の結果を確認することなく、吹止後直ちに出鋼する、QDT (Quick and Direct Tapping) 操業が可能となり、吹止から出鋼までの所要時間を、Fig. 15 のように大幅に短縮できた。また、歩留については、スロッピングと再吹錬の低減、吹止から出鋼までの所要時間の短縮による熱ロスの減少、および生石灰原単位の低減等により、Fig. 16 に示すように、低炭素リムド鋼の鉄歩留が0.5~1.0%向上した。これらの成果をまとめて Table 2 に示す。

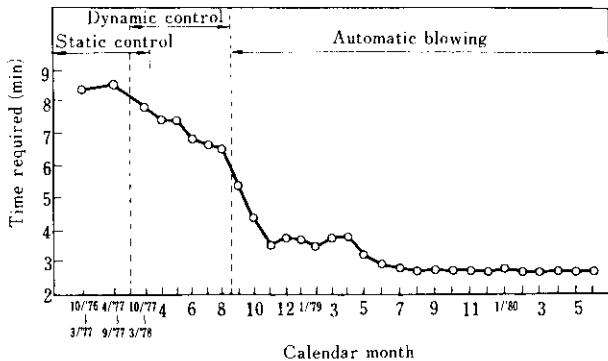


Fig. 15 Change of the time between blow end and tapping

7. 上底吹き転炉への適用

Q-BOP のすぐれた操業成績の発表以来、炉底からガスを吹込み鋼浴の攪拌力を増す研究が活発に行われ、各種の上底吹き転炉が稼動し始めた。少量の不活性ガスを吹込む上底吹き転炉(当社では LD-KG 法)では、吹錬中のスラグフォーミングの状況は LD 法と大きな違いはなく、この全自動吹錬システムがそのまま適用可能である。

大量の酸素(最大1.5 Nm³/min・t)と生石灰を炉底から吹込む当社の K-BOP 法では、吹錬初期の脱珪終了期を除けば、スラグフォーミングは上吹き転炉や LD-KG に比べてはるかに小さい。しかし、Fig. 17 に示すように、投入生石灰の形状添加方法によっては、吹錬初期にスロッピングを生じる。その検出もランス振動測定によって可能であり⁵⁾、上吹き転炉のみならず、上底吹き転炉においても有効な技術として利用されている。

8. 結 言

ランス振動測定による滓化検知および制御技術を用いた純酸素上吹き転炉の全自動吹錬技術は、従来困難とされていた複雑な鋼種構成の製鉄所における、転炉吹錬の自動化を可能とした。その結果、転炉終点制御精度が向上し、吹止炭素、温度同時的中率の向上、吹止から出鋼までの所要時間の短縮等、転炉操業成績を著しく改善した^{6,7)}。

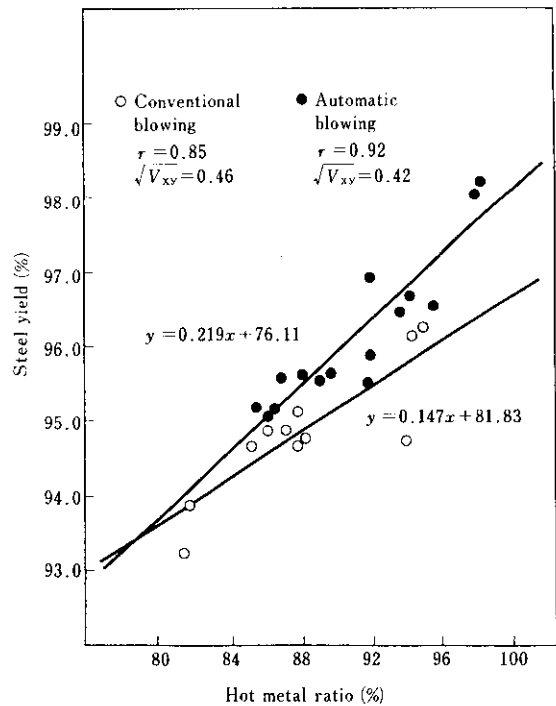


Fig. 16 Improvement of steel yield by automatic blowing (Low C rimming steel)

Table 2 Performance of automatic blowing

	Conventional	Fully automatic
Simultaneous hit ratio for C & temp. at blow end (%)	47	95
Reblow ratio (%)	For (P) & (S)	3.5
	Total	6.0
Time (Blow end ~ Tapping) (min)	8.5	2.5
Slopping heat ratio (%)	29	5.4
Change of steel yield (%)	0	+0.49
Change of lime consumption (kg/t)	0	-3
Life of furnace (heats)	1 400	2 100

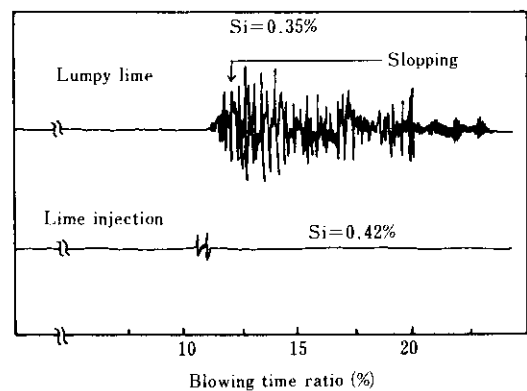


Fig. 17 Comparison of lance vibration behavior between lumpy lime addition and lime powder injection

参 考 文 献

- 1) 古茂田敏一, 川崎量一ら: 「転炉の新計算機制御システム」, 川崎製鉄技報, 2 (1970) 3, 41~55
- 2) K. Komoda, N. Shiokawa: 「The Computer Control System of the LD plant of Chiba Works」, International Conference on Iron and Steelmaking Automation, (1970) C-6
- 3) 飯田義治, 江本寛治ら: 「純酸素上吹き転炉におけるダイナミックコントロール技術の開発」, 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, 35~48
- 4) 機械工学便覧改訂第6版, (1977) 8~20, [日本機械学会]
- 5) 飯田義治, 江本寛治ら: 「上底吹き転炉におけるライムインジェクションの治金的効果」, 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 880
- 6) 飯田義治, 江本寛治ら: 「純酸素上吹き転炉における自動吹錬技術の開発」, 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 203
- 7) 飯田義治, 江本寛治ら: 「ランス振動測定による滓化検知技術」, 鉄と鋼, 65, (1979) 4, S 204