

転炉吹錬におけるりん・マンガン制御技術の 現状と今後の方向

金本通隆*・岡島正樹*・山根博史*・山内雅夫*

Phosphorus and Manganese Control Technologies in Basic Oxygen Furnace and Their Future View

Michitaka KANEMOTO, Masaki OKAJIMA, Hiroshi YAMANE and Masao YAMAUCHI

Synopsis :

Phosphorus and manganese content control technologies in Basic Oxygen Furnace (BOF) are focused to materialize the accurate refining control. The feature of three technologies conducted at Sakai steelmaking shop are discussed.

- (1) Phosphorus and manganese content control method based on the analysis of off-gas data
- (2) Expert system for BOF refining control
- (3) Real time manganese determinating technology

Taking account of labor saving, the refining control technologies of BOF should be more accurate and quick in near future. New technologies should analyse properties and compositions of slag and metal in real time and continuously, and control their metallurgical and physical conditions by the proper devices.

Key words : BOF ; blowing control ; expert system ; real time manganese analysis.

1. 緒 言

1949年にオーストリアにおいて、溶鉄に純酸素を上吹きする、いわゆるLD転炉が開発され、約40年の歴史がある。その間、転炉機能という面で見ると多くの技術が開発されている。例えば、上吹きランス形状・コンピューターによるスタティック制御¹⁾・サブランス情報を用いたダイナミック制御²⁾⁹⁾・上底吹き吹錬等はプロセスの機能、制御機能の向上に寄与している。また、最近の溶銑予備処理、および二次精錬の発達によって転炉に要求される機能も変化してきている。しかし、転炉の役割が今後も含めてどのような形に変化しようとするプロセスの制御性は、そのプロセスの生死を左右する大きな因子であることは間違いはない。

そこで堺製鉄所で開発・実機化してきたことを中心に転炉の吹錬制御の考え方を報告する。

2. 転炉吹錬制御の現状と基本的考え方

2.1 転炉吹錬制御の現状

転炉の吹錬において制御すべき対象項目としては吹止めの炭素、マンガン、りん、硫黄および溶鋼の温度があ

る。そのいずれの制御も、スタティック制御および、吹錬末期の中間サブランス測定に基づいている。現状の制御精度については、溶鋼の炭素および温度はサブランスの導入及び、それに基づくダイナミック制御によって大幅に向上した。また、硫黄については転炉内において大幅に制御することは困難であり、低硫鋼ニーズの増加によって溶銑予備脱硫が必須となっている。りんについては、最近では予備脱りん設備の普及によって、転炉におけるりんのコントロールの重要性は若干薄れてきたが、逆に、マンガンの制御が転炉で高マンガン還元を狙う意味からも非常に重要となっている。

2.2 制御の考え方

プロセスをより良く制御するためには、プロセスそのものの安定化(再現性)および精度の良いオンラインでの制御手段をもつことの二つがある。プロセスの安定化はマクロな制御であり間接制御である。一方、オンライン制御はミクロな制御であり直接制御である。基本的にはオンライン、リアルタイムに成分・温度を検出し、予測し、オンラインで制御すれば良いが、実際問題としては制御範囲にも限界があり、プロセスそのものの安定化も重要である。

平成2年3月22日受付 (Received Mar. 22, 1990)

* 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp., 1 Chikkoyahatamachi Sakai 590)

堺製鉄所で開発した吹錬制御技術のうち、主として、P, Mn の制御に関する技術として、

- ①排ガス情報による P, Mn の制御
- ②転炉吹錬エキスパートシステム
- ③転炉オンライン [Mn] 分析

について以下に詳述する。

3. 排ガス情報によるりん、マンガンの制御

堺製鉄所においては、早くから排ガス情報による制御を試みており、転炉吹錬における吹止め P, Mn のばらつき減少に大きく寄与している。以下にその計測システム・試験結果を報告する。

3.1 排ガス情報の計測システム

実験は、堺製鉄所 170 t 上底吹き転炉で行った。Table 1 に転炉および OG 装置の主な設備仕様を示す。

Table 1. Main specifications of LD converter and OG system.

Equipment	Item	Specification
BOF Oxygen equipment OG	Capacity Blowing capacity IDF capacity Main dust collector	170 t/heat×3 vessels 40 000 Nm ³ /h max. 102 000 Nm ³ /h max. Pease-Anthony venturi scrubber

Table 2. Main specifications of mass spectrometer.

Item	Specification
Mass spectrometer Analysis	MG-1200 of Perkin-Elmer Corp., USA Simultaneous analysis for 8 components (CO, CO ₂ , O ₂ , N ₂ , H ₂ , Ar, CH ₄ , He)
Response time	1 s
Accuracy	±0.1% over full scale

また、Fig. 1 に排ガス情報の計測システムを示す。排ガス組成は、Table 2 に示す質量分析計を用いて 8 成分を同時に連続分析した。排ガス流量の測定には、OG 装置の水平煙道に設けられたベンチュリー差圧流量計を使用した。

3.2 制御の動的パラメーターとしての炉内残留酸素量 (O_S) の算出

スラグの酸化度に相当するパラメーターとして、スラグ中に時々刻々に蓄積していく酸素量を炉内の酸素バランスの推移より算出することとした。

炉内に装入される酸素量は、上吹き酸素量、媒溶剤および底吹き CO₂ 量が分解して酸化反応に参与する酸素量を考慮し、一方炉内より排出される酸素量は、炉内で発生するガスとして持ち去られる酸素分を考えることとした。ただし、炉内で発生するガス量は直接測定できないため OG 装置の煙道の排ガス情報より、炉口での発生ガス燃焼変化を大気中の N₂ を基準に補正して推定した。このようにして、炉内に装入される酸素量と排出される酸素量（発生ガス中の酸素量）の差として、炉内に残留する酸素量を時々刻々算出する。この瞬間値を炉内残留酸素量変化 (dO_S) とする。この dO_S の積分値から、溶鉄中のけい素の酸化に費やされて酸化けい素としてスラグ中に残留する酸素量を差し引いたものを、炉内残留酸素量と考える。

ここで、酸化けい素に相当する酸素量を差し引く理由は、酸化けい素として固定された酸素量は、スラグの酸化ポテンシャルとして酸化反応に参与しないからである。したがって、炉内残留酸素量 (O_S) は、便宜的に酸化けい素としての酸素量を差し引いた以下の式で求めるものと定義する。以上より、dO_S および O_S は、上吹

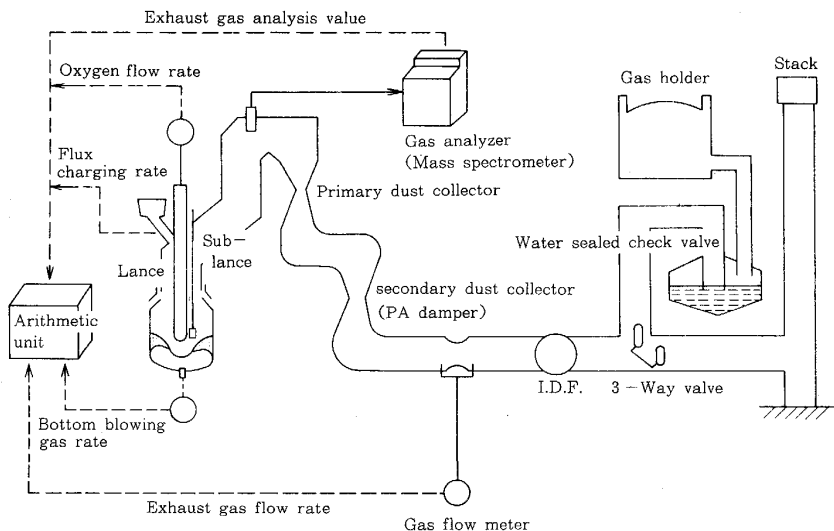


Fig. 1. Data sampling system for O_S estimation.

き酸素流量, 媒溶剤添加速度, 底吹き CO₂ 流量および炉内発生ガス流量に基づき, これに炉内発生ガスの転炉炉口での燃焼による補正と排ガス分析遅れ時間の補正を行うことにより, (1), (2)式で求めることができる。

ここで O_S は, 排ガス情報より求めるので便宜的にその単位としては体積表示 (Nm³) を用いるものとした。

$$dO_S = \{ F_{TO_2} + F_{BCO_2} + \sum_i (\alpha_i + \beta_i + 1/\gamma_i) W_i \} - (1/2 F_{CO}^E + F_{CO_2}^E) \dots\dots\dots(1)$$

$$O_S = \int_t (dO_S) dt - x W_{HM} [Si]_{HM} \dots\dots\dots(2)$$

ここに,

$$F_{CO}^E = F_{CO} + 2 \cdot (21/79 F_{N_2} - F_{O_2})$$

$$F_{CO_2}^E = F_{CO_2} - 2 \cdot (21/79 F_{N_2} - F_{O_2})$$

$$F_{CO} = F_{EX}(t - \tau) C_{CO}(t)$$

$$F_{CO_2} = F_{EX}(t - \tau) C_{CO_2}(t)$$

$$F_{N_2} = F_{EX}(t - \tau) C_{N_2}(t)$$

$$F_{O_2} = F_{EX}(t - \tau) C_{O_2}(t)$$

ただし,

- dO_S: 炉内残留酸素量変化 (Nm³/h)
- O_S: 炉内残留酸素量 (Nm³)
- F_{TO₂}: 上吹き酸素流量 (Nm³/h)
- F_{BCO₂}: 底吹き CO₂ 流量 (Nm³/h)
- α_i: 媒溶剤中 O₂ 含有量 (FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃ および MnO として含まれる酸素量) (Nm³/kg)

- β_i: 媒溶剤中 CO₂ 含有量 (CaCO₃ および MgCO₃ の分解による CO₂ 量) (Nm³/kg)
- γ_i: 媒溶剤中 H₂ 含有量 (付着水分および結晶水に含まれる水素量) (Nm³/kg)
- W_i: 媒溶剤添加速度 (kg/h)
- i: 媒溶剤銘柄
- C_{CO}: 排ガス中 CO ガス濃度 (vol%)
- C_{CO₂}: 排ガス中 CO₂ ガス濃度 (vol%)
- C_{N₂}: 排ガス中 N₂ ガス濃度 (vol%)
- C_{O₂}: 排ガス中 O₂ ガス濃度 (vol%)
- F_{CO}: 排ガス中 CO ガス流量 (Nm³/h)
- F_{CO₂}: 排ガス中 CO₂ ガス流量 (Nm³/h)
- F_{N₂}: 排ガス中 N₂ ガス流量 (Nm³/h)
- F_{O₂}: 排ガス中 O₂ ガス流量 (Nm³/h)
- F_{EX}: 排ガス流量 (Nm³/h)
- F_{CO₂}^E: 炉内発生 CO₂ 流量 (Nm³/h)
- F_{CO}^E: 炉内発生 CO 流量 (Nm³/h)
- t: 任意の時刻 (s)
- τ: 排ガス分析計の分析遅れ時間 (s)
- W_{HM}: 銑鉄重量 (kg)
- [Si]_{HM}: 銑鉄中けい素濃度 (wt%)
- x: けい素の酸化に必要な酸素量を O₂ に変換する係数

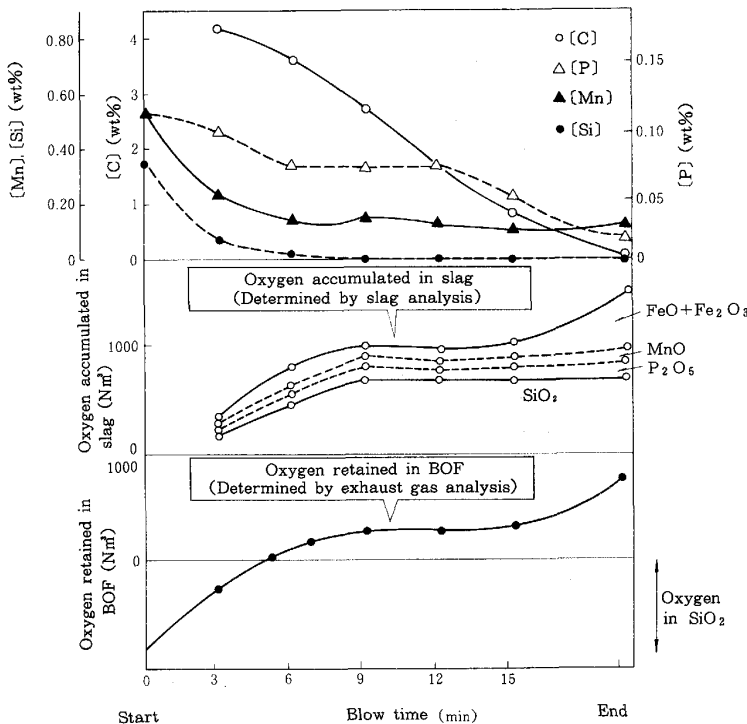


Fig. 2. Typical examples of changes in parameters during blowing.

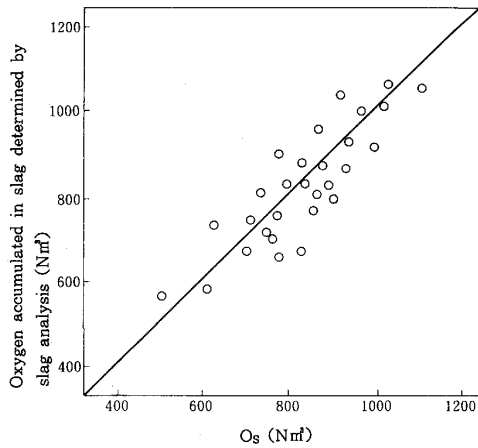


Fig. 3. Relation between O_S and amount of oxygen accumulated in slag determined by analysis.

3.3 吹錬中における炉内残留酸素量 O_S の挙動

Fig. 2 に、吹錬中の溶鉄組成、およびスラグ中への蓄積酸素量の変化と O_S の時間的推移 (O_S パターン) の代表例を示す。 O_S は排ガス情報の連続処理により、(2)式に基づいて求めたものである。スラグ中への蓄積酸素量の変化は、スラグ分析値より求めたものである。 O_S の推移はスラグ中の蓄積酸素量の推移とよく一致している。

また、Fig. 3 に、終点におけるスラグ分析値より求めたスラグ中の蓄積酸素量（酸化けい素の酸素相当分を除く）と、排ガス情報より求めた O_S の関係を示す。 O_S は終点時においてもスラグ分析値とよく対応している。Fig. 2, Fig. 3 より、吹錬中連続して得られる O_S はスラグ中の酸化ポテンシャルを表す $(FeO) + (MnO) + (Fe_2O_3)$ に相当するとも考えられ、かつ吹錬反応の進行を表す指標になり得ると考えた。

3.4 吹錬操作端による炉内残留酸素量変化 O_S の制御性

実験は、吹錬の中期において上吹き条件の操作端として上吹き酸素流量およびランス高さを、底吹き条件の操作端として底吹き CO_2 流量をそれぞれ単独にある時間一定量を変化させ、その前後の dO_S の変化量を調査し比較した。

実験結果を上吹き条件と底吹き条件のおおのの操作端変更量を横軸とし、 dO_S の変化を縦軸として Fig. 4 に示す。

それぞれに dO_S の変化に対し、強い相関関係が認められ、ランス高さには正の相関があり、上吹き酸素流量と底吹き CO_2 流量は負の相関があった。ただ、ランス高さは、実際の吹錬においては、その操作範囲が広い上

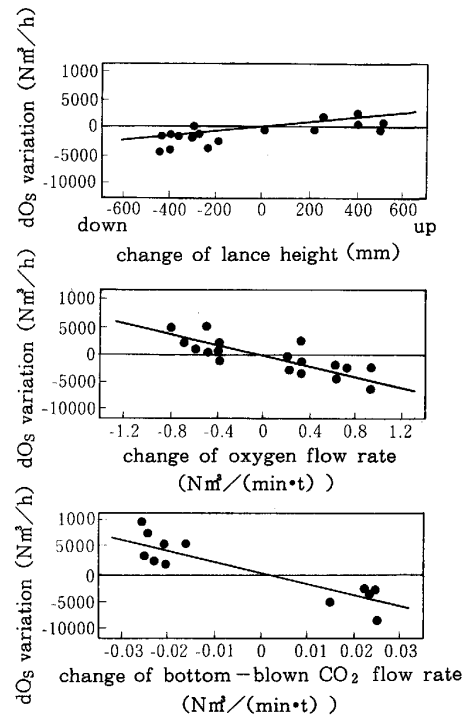


Fig. 4. Relation between change of manipulated variable and dO_S variation.

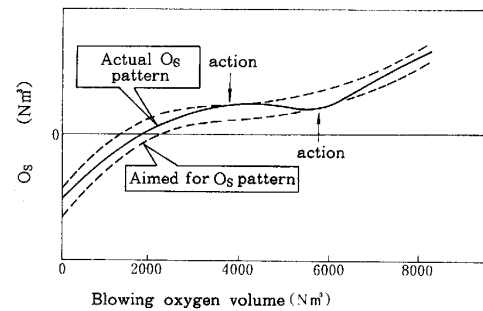


Fig. 5. Blowing operation control procedure.

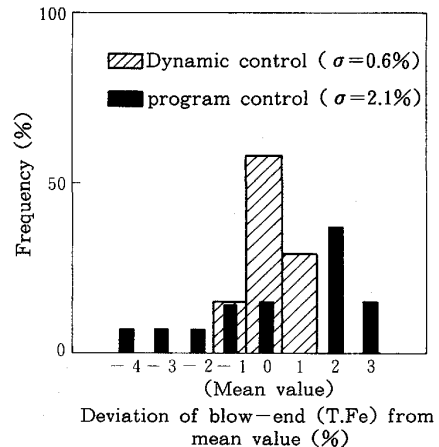


Fig. 6. Comparison of variance of blow-end (T.Fe) under program control/dynamic control of bottom-blown CO_2 flow rate.

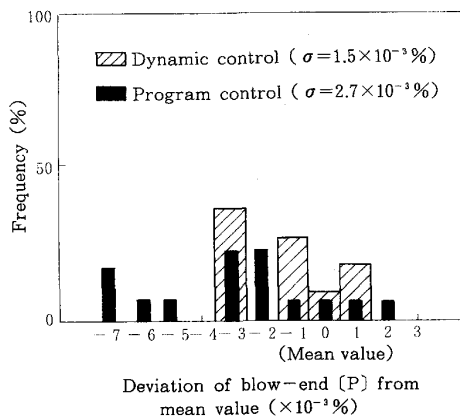


Fig. 7. Comparison of variance of blow-end [P] under program control/dynamic control of bottom-blown CO₂ flow rate.

吹き酸素流量および底吹き CO₂ 流量と比較し、ランス高さの dO_S 変化に与える影響は小さい。

3.5 実プロセスへの応用

O_S を適正に制御するためには O_S の適正なパターンを目標としてあらかじめ定める必要がある。そこで過去において良好な吹錬結果を示した O_S パターンを再現することによって良好な吹錬結果が再現できるものと考え、過去の複数ヒートの中から良好な吹錬の O_S パターンを選択し、目標の O_S パターンとした。その O_S の制御方法の一例を Fig. 5 に示す。

実際の吹錬に本制御を適用した結果を示す。

Fig. 6 は、転炉スラグの酸化ポテンシャル状態を近似的に表す代表的指標である (T.Fe) について、吹錬終了後のスラグ分析をもとに、本制御方式の効果を示したものである。同じく Fig. 7 は、吹錬終了時点の溶鋼中りん濃度での比較である。いずれの比較指標においても本制御方式の適用によりばらつきが大きく改善されている。

4. エキスパートシステム適用による吹錬制御技術

4.1 従来の吹錬制御技術の限界とエキスパートシステムの特徴

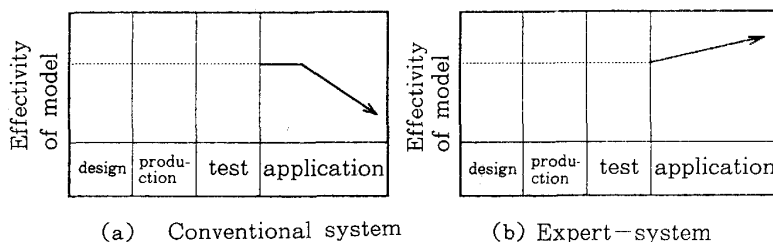


Fig. 8. Practical effectivity of model.

従来の吹錬制御技術には、次のような限界があった。

①数式モデルの限界

従来の吹錬制御技術は、物質収支、熱収支を基本としているが、これには限界があり、例えば、炉の状態などという定性的な情報は作業者が従来のモデルを補完することにより高い操業レベルを維持させてきた。このような作業者のもつ経験的知識を従来のモデルに組み込むことは極めて困難であった。

②システム設計の限界

従来の「機能設計」「フローチャート」「コーディング」といったシステム設計では、個人のノウハウをシステムに反映させることは極めて困難であった。

③従来計算機の限界

FORTRAN 等を言語とするシステムでは、簡単な変更でも計算機内の処理を熟知した人間でないと困難であるため、モデルの柔軟な変更が行われにくい。したがって、実機化当初は大きな効果を発揮したモデルでも、長時間の使用により設備条件や操業環境が変化すると、メンテナンス性の悪さのためにその精度が悪化してくるのが現状であった。

Fig. 8 に従来システムとエキスパートシステムでのモデルの有効性を模式的に示す。

従来のシステムに比較して、エキスパートシステムは、

- ①経験的知識などのあいまいな問題を扱うことが容易
- ②知識の追加・修正が容易

という特徴をもっているため、システムのソフトウェアのメンテナンスが容易であり、知識ベースの中の知識を簡単に変更でき、モデルの有効性を高く維持できる。

4.2 システム構成

Fig. 9 にエキスパートシステムを適用した吹錬制御技術のシステム構成を示す。

AI ツールとしては、ESHELL (FACOM)、エキスパートシステム開発用計算機としては S-3500 (FACOM) を導入し、既存のプロコンのデータ収集機能を活用するシステムとした。

転炉操業に対応して各種の推論を実行する。吹錬中の推論については最短 8 s 周期で実行する。

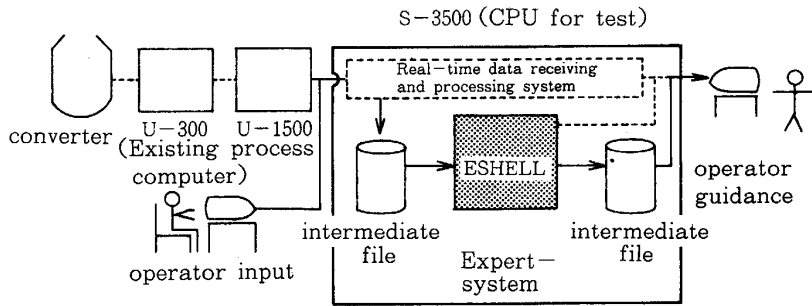


Fig. 9. System configuration.

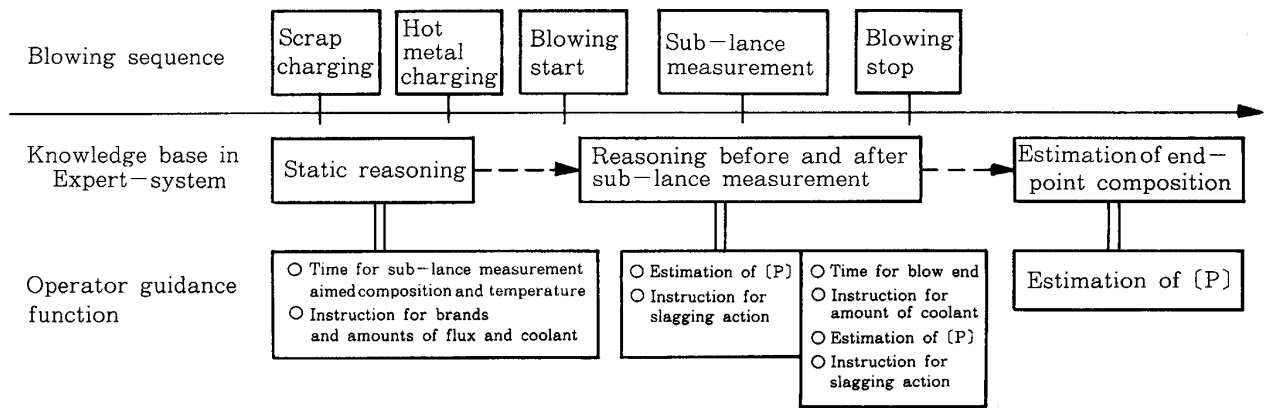


Fig. 10. Relation between blowing sequence and knowledge bases.

4.3 知識ベースの構成

Fig. 10 に転炉操業と知識ベースの関係を示す。作業者の知識を次の三つの知識ベースに分類して整理し本システムを構成した。

①スタティック推論

吹錬開始前に行うスタティックモデル(吹錬戦略)計算に副原料 *etc.* の装入計算補正を加える。

②サブランス前後推論

排ガス分析から求めたスラグ中蓄積酸素量 (O_S) をもとに吹錬中の滓化状況を監視し、サブランス測定時の [P] 濃度を推定する。また、サブランス測定結果に基づいて送酸条件の変更、冷材の投入 *etc.* の補正アクションを行うとともに、吹止め時期の決定を行う。

③終点成分推定

迅速出鋼のために、終点成分 [P] を推定する。また、これらの知識ベースは機能単位で細分化されており、これによりルールの構築・修正が容易なシステムとなった。

4.4 知識の表現

知識の表現は、主に If~then 型を使用した。一例を以下に示す。

(例) If 炉口圧の振幅が大きい then 滓化はやや良い
これらをルールとしてまとめた例として、Table 3 に

滓化判定用ルールの例を示す。

Table 3 に示すように、作業者の持つ「おおい」や「やや良い」といった境界を明確にしにくいルールを有効に表現するために、ファジィ推論を採用した。

4.5 適用結果

本システムの実操業への適用テストを行い、通常操業のものと比較した。テストにおいては、吹止め [Mn] の高くなる吹錬を指向したテストとした。

Table 4 に本システムと通常操業の吹錬結果の比較を示す。なお、通常操業のものは、吹錬経験 5 年以上の熟練吹錬者と 5 年未満の若手吹錬者のデータに分け、若手吹錬者の成績をベースとして整理した。

本システムの適用テスト結果として、吹止め [Mn] については、指向したとおりに極めて高い成績が得られ、熟練吹錬者のレベルを超える操業が実現できた。また、同時的中率についても通常操業を上回る成績をあげることができた。

このことにより、エキスパートシステムの吹錬制御分野への適用の有効性を確認するとともに、将来、熟練者の技能を排除し、工程能力を向上させた上で省力化を推進することが可能となった。

Table 3. [P] concentration estimation knowledge.

Factor	Condition part		Conclusion part		Weighed mean of rules
	Status	Range		Degree of dephosphorization	
		Min.	Max.		
[Si] in hot metal	Big Medium Small	0.15%	0.40%	Nearly good Normal Nearly bad	0.5
Hot metal temperature	Big Medium Small	1 450°C	1 150°C	Nearly good Normal Nearly bad	0.5
O _S gradient	Big Medium Small	Learning from preceding heats		Good Normal Bad	1.0
Quantity of fluorspar	Big Medium Small	1.5 t/ch	0 t/ch	Nearly good Normal Nearly bad	1.0
Amplitude of hood pressure	Big Medium Small	Learning from preceding heats		Good Normal Bad	0.5

Table 4. Comparison of results at the blow end.

Item	Un-skilled operators		Skilled operators		Expert-system	
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
Blow end [C] (10 ⁻² %)	15.7	3.4	16.6	3.2	17.2	2.7
Blow end [Mn] (10 ⁻² %)	51.6	7.0	54.3	7.5	57.1	5.8
Temp. [C] Simultaneous hitting ratio (%)	Base	—	B+5.0	—	B+7.2	—
Reblow ratio (%)	Base	—	B+2.8	—	B+0.2	—

5. 溶鋼オンライン [Mn] 分析技術

5.1 目的

転炉吹錬において、吹止め成分のばらつきを減少させるためには、精錬中の溶鋼成分をリアルタイムに直接に検出するオンライン分析の開発が要望されている。本章では、転炉操業における酸素吹錬時に形成される火点を溶鋼の直接発光分光分析用の光源として着目し火点からの発光スペクトルを測定することにより、転炉内の溶鋼を直接分析する方法について検討した。

5.2 実験方法

実機設備の概要を Fig. 11 に示す。吹錬用上吹きランスの内管にステンレス製ガイドパイプで保護された光ファイバーを内挿し、170 t 上底吹き転炉で実験を行った。火点を観測するため、視野が羽口主孔を向くように光ファイバー先端のレンズ系を作製した。火点での発光スペクトルは、この 80 m の光ファイバーにより転炉上部に設置した高速スキャン型分光器および二色温度計まで伝達され、電気信号に変換した。データ処理は計器室に設置したパソコンにて行った。なお、光ファイバーは石英製の 4 本バンドルタイプを使用し、3 本を分光器へ、

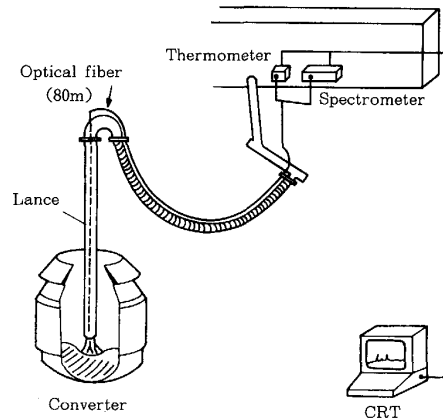


Fig. 11. Schematic diagram of on-line manganese analysis system.

1 本を二色温度計へ接続した。測定は [Mn]=0.2~1.0 % の範囲で行い、吹錬中のサブランスサンプルのカウントバック分析値と比較した。

5.3 試験結果

Fig. 12 に火点からの発光スペクトル強度比と溶鋼中マンガン濃度との相関を示す。火点からの発光スペクトルは、Fig. 12 からわかるように火点温度で層別することにより発光スペクトルの強度比と溶鋼中マンガン濃度との間には良好な相関関係が得られた。

さらに、この火点温度によって層別された相関を使って Mn 濃度を求め、サブランスサンプルの固体発光法による分析値と比較した結果を Fig. 13 に示す。図に示すように良い相関を示している。

本法によって、吹錬中の Mn 挙動とその間に吹錬中にサブランスによって採取したサンプルの分析値と比較した例を Fig. 14 に示すが良く一致している。

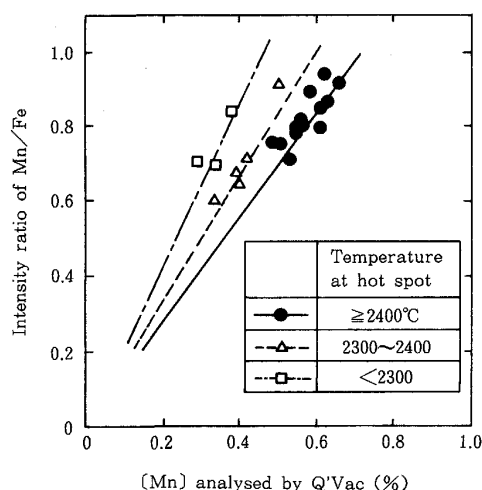


Fig. 12. Relation between Mn concentration and intensity ratio of Mn/Fe.

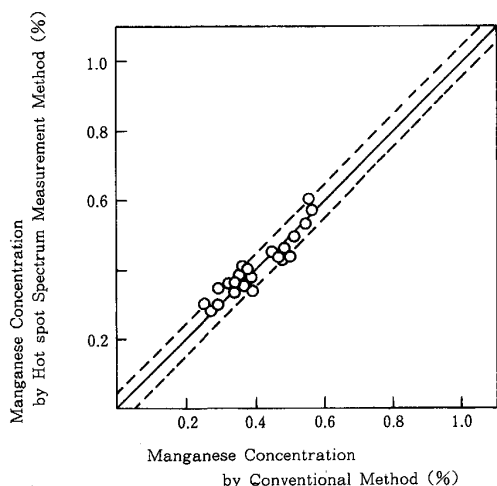


Fig. 13. Comparison with sub-lance and measuring emission spectra.

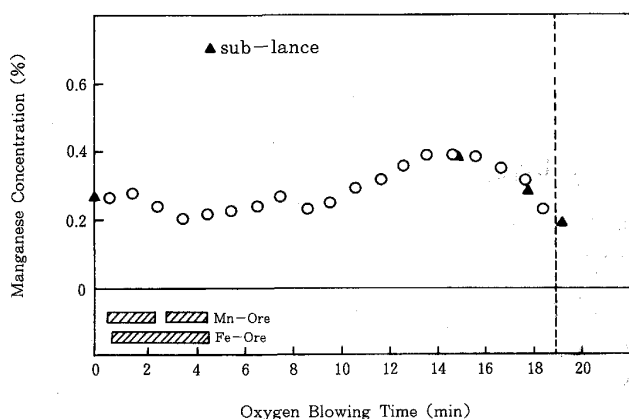


Fig. 14. Result of on-line analysis during blowing.

6. 転炉精錬制御の今後の方向

転炉の役割も全体プロセスの変化に応じて変わってきている。最近の複合吹錬の導入、溶銑予備処理の導入、Mn 鉱石の大量使用、自動化、省力化のニーズ増加等の転炉環境条件の変化によって転炉における精錬制御の目的も従来からの吹止め C, Mn, P, S, 温度のばらつき減少および副原料（生石灰、ドロマイト etc.）の有効な使用に加えてダスト発生の減少、更には転炉の完全自動化と変化している。そこで現状の制御手段の問題点は以下のように考えられる。

まず第一に溶鋼の成分、温度の直接検出はサブランスの一点情報のみであり、連続ではなく、リアルタイムに検出できていない。従って、スタティック制御が主体とならざるを得ない。第二に制御の対象が炭素・温度主体であり、りん・マンガンに関するものは、非常に少ない。また制御端も制御対象に対して適切でない場合が多い。従って、制御手段の考え方として下記の方向で将来開発されるべきと考える。

- ①メタル・スラグをそれぞれ直接的・連続的・オンラインで検出。
- ②メタル・スラグをそれぞれ迅速・確実な直接制御
- ③ダスト発生防止のためのスラグカバー制御
- ④省力化のための完全自動制御

7. 結 言

今後の転炉の吹錬制御技術の方向として、省力化を考慮し、メタル・スラグの性状を直接・連続・リアルタイムに検出し、適切な検出端によってメタル・スラグをそれぞれ迅速・確実な制御を指向すべきと考える。

文 献

- 1) LD 委員会 10 周年記念論文集 (LD 委員会 10 周年記念論文編集委員会編) (1969), p. 318
- 2) D. W. KERN, P. D. STELTZ and R. J. FRADENECK: J. Met, 23 (1971) 8, p. 9
- 3) 水谷 誠, 川見 明, 小林 肇, 佐々木恵一: 鉄と鋼, 59 (1973), S393
- 4) 甲斐 幹, 久保田達之, 讃岐新一, 久米友明, 上田裕二郎: 鉄と鋼, 62 (1976), S114
- 5) 飯田義治, 江本寛治, 難波昭彦, 山田博右, 武 英雄, 増田康男: 鉄と鋼, 63 (1977), A83
- 6) 成田貴一, 富田昭津, 片桐 望, 喜多村実, 川崎正蔵, 金塚奉夫: 鉄と鋼, 63 (1977), A87
- 7) 梨和 甫, 杉田 宏, 池内祥晴, 栗林 隆, 加藤木健: 鉄と鋼, 63 (1977), A91
- 8) 田口喜代美, 尾関昭矢, 長谷川輝之, 白谷勇介, 坪井 勇, 松井邦雄: 鉄と鋼, 63 (1977), A95
- 9) 井上俊朗, 竹村洋三, 杉原弘祥, 久保田達之: 鉄と鋼, 63 (1977), A99