
底吹き転炉における排ガス回収技術の向上

Improvement in Off-Gas Recovery from Q-BOP

馬田 一(Hajime Bada) 山田 純夫(Sumio Yamada) 数土 文夫(Fumio Sudo) 矢
治 源平(Motoyasu Yaji) 小高 幹男(Mikio Kodaka)

要旨：

当社千葉製鉄所第3製鋼工場は、我国最初の底吹き転炉（Q-BOP）工場であり、その排ガス処理設備として OG 法を採用し、排ガスの持つエネルギーを有効に回収している。回収エネルギー原単位の向上には、回収ガスの燃焼率の低減が有効であり、発生ガス量の変動を抑え、炉口部でのシールを強化することにより、燃焼率を2～3%まで低減させた。さらに回収時間の延長や機器の信頼性の向上により、ガス回収原単位は、約 $270 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ にまで到達した。底吹き転炉をエネルギー変換炉と考え、石灰石を吹込む実験を行った結果によれば、石灰石の分解による CO ガスを、ほぼ理論通り回収できることが確認できた。

Synopsis：

No.3 steel plant at Chiba Works has two 230t Q-BOPs for the first time in Japan, which are equipped with OG system as off-gas cleaning equipment, and consequently off-gas energy from Q-BOPs is recovered effectively as fuel for power plant. To increase energy recovery, it is effective to reduce combustion ratio of off-gas from Q-BOPs. Chiba's Q-BOPs have decreased the combustion ratio from 5% to 2 or 3% by means of improvement of sealing between furnace and skirt hood. Then, the recovery time of off-gas from Q-BOPs has been extended and the reliability of gas sampler and gas analyzer has been improved. Consequently, the amount of energy recovered from off-gas has increased to about $270 \times 10^3 \text{ kcal/t}$. Q-BOP has shown additional advantage of CO gas recovery by injecting limestone powder through the bottom tuyeres.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

馬田 一* 山田 純夫** 数土 文夫*** 矢治 源平**** 小高 幹男*****

Improvement in Off-Gas Recovery from Q-BOP

Hajime Bada, Sumio Yamada, Fumio Sudo, Motoyasu Yaji, Mikio Kodaka

要旨

当社千葉製鉄所第3製鋼工場は、我国最初の底吹き転炉(Q-BOP)工場であり、その排ガス処理設備としてOG法を採用し、排ガスの持つエネルギーを有効に回収している。回収エネルギー原単位の向上には、回収ガスの燃焼率の低減が有効であり、発生ガス量の変動を抑え、炉口部でのシーリングを強化することにより、燃焼率を2~3%にまで低減させた。さらに回収時間の延長や機器の信頼性の向上により、ガス回収原単位は、約 270×10^3 kcal/tにまで到達した。底吹き転炉をエネルギー変換炉と考え、石灰石を吹込む実験を行った結果によれば、石灰石の分解によるCOガスを、ほぼ理論通り回収できることが確認できた。

Synopsis:

No. 3 steel plant at Chiba Works has two 230 t Q-BOPs for the first time in Japan, which are equipped with OG system as off-gas cleaning equipment, and consequently off-gas energy from Q-BOPs is recovered effectively as fuel for power plant. To increase energy recovery, it is effective to reduce combustion ratio of off-gas from Q-BOPs. Chiba's Q-BOPs have decreased the combustion ratio from 5% to 2 or 3% by means of improvement of sealing between furnace and skirt hood. Then, the recovery time of off-gas from Q-BOPs has been extended and the reliability of gas sampler and gas analyzer has been improved. Consequently, the amount of energy recovered from off-gas has increased to about 270×10^3 kcal/t.

Q-BOP has shown additional advantage of CO gas recovery by injecting limestone powder through the bottom tuyeres.

1. 緒 言

製鋼工程における省エネルギーのなかで、転炉排ガス回収量の増大は重要な課題であり、近年のエネルギー価格の上昇を契機として、一層の操業改善および新技術の開発が進められている^{1,2)}。

千葉製鉄所第3製鋼工場では、我が国で最初の底吹き転炉(Q-BOP)を設置し、排ガス処理設備としてOG法を採用した。排ガス回収を効率的に行うには、転炉炉内反応に応じた適切な制御方法が必要であり、従来の上吹き転炉とは精錬反応特性が異なる底吹き転炉に排ガス回収設備を設置するに際しては、集塵効率、安全性、経済性を考慮した設計を行った。

底吹き転炉の特徴の一つは、上吹き転炉に比べて、スロッピング、スピittingが少なく、炉内反応が非常に安定していることである。また、羽口の冷却用に炭化水素ガスを使用しているために排ガス中の水素ガス濃度が高く、かつ、ガス発生量も多い。

上記の特徴に対応して、排ガス回収設備の稼動以来、各種の改善を実施した結果、 270×10^3 kcal/t良塊の回収エネルギー原単位を記録するまでに至った。以下に、回収原単位向上策を主体にして、その概要を報告する。

2. 設備概要

本設備の系統図を Fig. 1 に示す。一般に OG 設備のガス冷却

器は、開放型冷却塔を使用したメンブレン方式を採用しているが、その欠点として以下の3項目が挙げられる。

- (1) 開放型であるため冷却水系統の水質管理が困難で、スケールの付着が起りやすい。
- (2) くり返しの温度変化を受けるために、ガス冷却器のチューブにクラックが発生しやすい。
- (3) フード部の構造が複雑で、修繕コストが高い。

上記の欠点を解消するとともに、大気中に放散していた排ガス顕熱を回収するために、フード部を蒸発冷却方式とし、輻射部をボイラー方式とした。

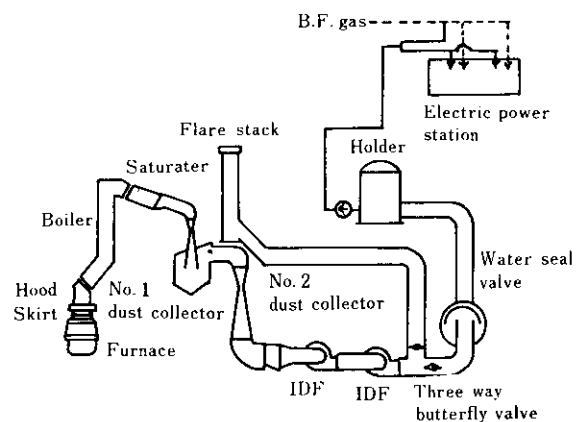


Fig. 1 Schematic gas flow of OG system

* 千葉製鉄所製鋼部第3製鋼課掛長
 ** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(掛長)
 *** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(課長)
 **** 知多製鉄所第2造管部シームレス管技術室
 (昭和58年1月12日原稿受付)

** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(掛長)
 **** 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査(掛長)

3. 回収エネルギー原単位の向上策

3.1 回収チャージ率の向上

操業初期には、回収設備の初期トラブル、回収条件設定値の不備、操業の不慣れなどにより、全放散、途中放散を行うこともあったが、機器の信頼性の向上と、定修および炉修時の設備保全の徹底を図り、設備の故障によるトラブルは解消した。

現在では炉修後、定修後の1ヒート日から排ガス回収を実施しており、回収チャージ率は100%となっている。

3.2 回収時間の延長

3.2.1 ガス使用量の計算機コントロール

転炉ガスは間欠的に発生するため、ガスホルダーをバッファとして発生量と使用量のバランスを図っている。Fig. 2は第3製鋼工場地区における回収ガスの系統図である。回収ガスは60 000 m³のホルダーに貯えられ、発電所に給送される。発電所では、転炉ガスの単独燃焼および高炉ガス等との混合燃焼が可能となっているが、急激に使用量を変動させることは難しい。そのために、転炉ガスの安定使用を目的とした、予測制御システムを導入した。

Fig. 3に、予測制御システムの概念図を示す。本システムは、転炉操業の状況を把握し、転炉ガス発生量を予測することによ

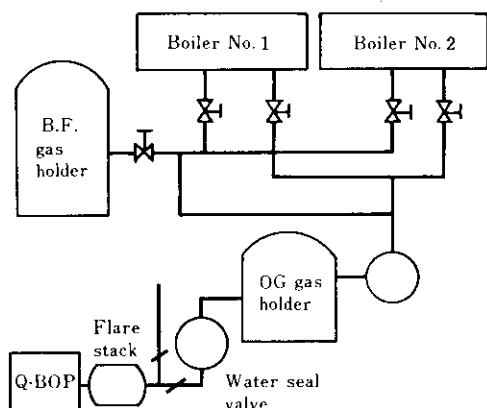


Fig. 2 Schematic flow of OG and B.F. gases

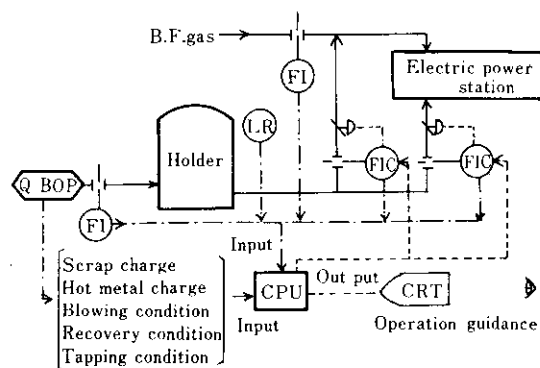


Fig. 3 Computer control system in the usage of Q-BOP and B.F. gases

り、ガスホルダーレベルをコントロールする。Fig. 4は、発電所における転炉ガス、高炉ガスの使用状況の例であるが、制御システム稼動後は、ガス使用量の変動が小さくなっており、本予測システムが効果を現している。また、本システムの稼動により、ホルダー上限到達によるガス放散は皆無となっている。

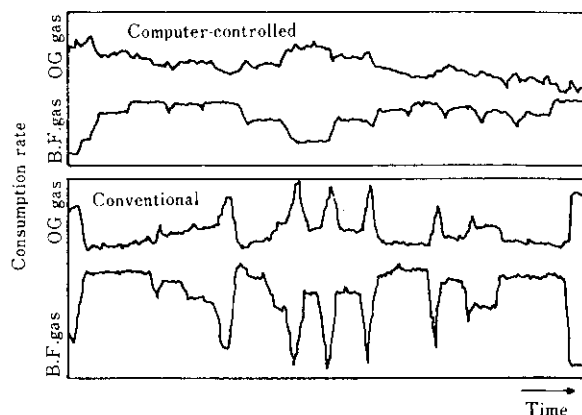


Fig. 4 Effect of computer control in the usage of OG and B.F. gases

3.2.2 前・後燃パターンの改善

排ガス回収量を増加させるには、前燃、後燃時間を極力短縮することが望ましい。煙道内における不活性ガスの生成所要時期と煙道内のガス滞留状況を調べるために、炉頂と煙突でのガス分析を同時に行った。その結果、両者の排ガス成分変動に差はなく、ほぼ理想的なピストンフロー状態になっていることが分った。このことから、不活性ガス生成時間を数秒程度まで短縮しても、可燃性ガスと空気との混合による爆発の危険はないことがわかった。これらの調査と同時に、底吹き転炉の脱炭効率の検討を行い、確実に不活性ガス層を生成し、かつ、回収時間を延長できる前・後燃パターンを設定した。この改善により、回収時間は1、7分(29 000 kcal/t)増加した。

3.2.3 ガス分析時間の短縮

排ガス回収装置における爆発防止対策の基本的な考え方は、爆発限界以上のCOガスあるいはH₂ガスを含む排ガスと、酸素を限界値以上に含んだガス(空気)とを回収系統内で混合させないことにある。すなわち、吹錬の初期および末期にスカートを上げ、炉口部で排ガスを燃焼させて、COガス、H₂ガス、O₂ガスのすべてが限界値より低い不活性ガス層を生成させる。しかし、溶銑成分、吹送溶鋼成分、送酸速度等により、不活性ガス層生成条件が変化するので、確実に不活性ガス層を生成するように、送酸速度、鉄鉱石投入速度あるいは排ガス吸引流量等のパターンを、吹錬の初期(前燃焼期)および末期(後燃期)について、それぞれ決める必要がある。

この前・後燃の時期を避けて排ガス回収を実施するために、吹錬中のダクト内の酸素ガス、一酸化炭素ガス濃度を連続的に測定し、条件判定を行っている。千葉第3製鋼工場の場合は、一酸化炭素濃度30%以上、酸素ガス濃度1%以下を回収可能条件としている。安全性を維持しながら、排ガス回収開始を早めて回収時間を延長するためには、分析時間を短縮するとともに、分析値の信頼性を高めることが必要である。

Fig. 5 に、本設備における排ガスサンプリング系統図を示す。分析時間を短縮するために、サンプリングプローブ、サンプリングポンプ、配管の改善を実施した。プローブは1次フィルターを内蔵しており、フィルターの目過能力を低下させない限界まで容積を減らした。また、フィルターに付着するダストによりポンプ能力が低下するので、ポンプ容量を大きくし、これに適した配管径を選んだ。その結果、ガス回収時間を約30秒(8400 kcal/t) 延長することができた。

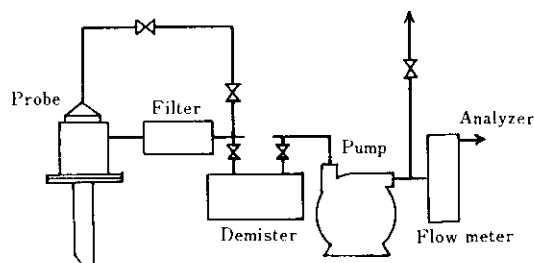


Fig. 5 Off-gas sampling system

3.3 燃焼率の低減

転炉ガスエネルギーの回収をより多く行うには、回収時間の延長と同時に、空気の吸込みを極力抑制して、転炉から発生するガスを可能な限り燃焼させずに回収することが望ましい。

3.3.1 スカートと炉口の隙間管理

燃焼率とスカート・炉口間隔には、Fig. 6 に示す関係があり、燃焼率を下げるにはスカート・炉口間隔を小さくすることが重要である³⁾。底吹き転炉ではスロッピング、スピittingの抑制が容易であり、炉口金物の上面に付着物がなく、スカート・炉口間隔を小さく管理することができる。スカート・炉口間隔 20~30 mm、燃焼率 4% の操作が可能である。

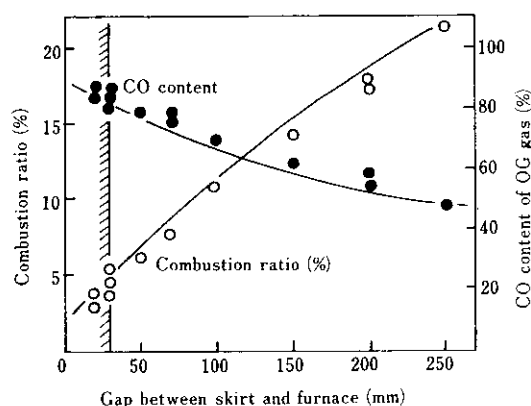


Fig. 6 Combustion ratio and CO content in relation to gap between skirt and furnace

3.3.2 フード内圧力の安定化

スカート・炉口間隔を小さくすればフード内圧力の変動は大きくなり、この結果、吹出しガス量の増大あるいは空気の吸込み量の増大をもたらす。フード内圧力の変動は、供給酸素量の急変や炉内反応速度の変動により生じると考えられる。底吹

き転炉では炉内反応は安定しており、前者の影響が大きく、吹錬中の鉄鉱石等の固体酸素源の投入開始時、終了時には供給酸素量が急変してフード内圧力の変動が大きくなっていた。そこで、Fig. 7 に示すように、全供給酸素量を一定とする制御を行い、フード内圧力を安定させた。

3.3.3 スカートと炉口の完全密閉

フード内圧力変動防止技術の確立により、スカートと炉口の隙間をさらに小さくして燃焼率の低減を図った。従来と同じ方法でスカートを炉口に近づけて下げると、変形した炉口金物によりスカート部のチューブが損傷を受け、水洩れの可能性がある。そこでスカート下部に Fig. 8 に示す耐火物製のシール材をチェーンで吊り下げる構造に改造した。本方法では、スカートと炉口の間にほぼ完全に密閉される。しかもシール装置の耐久性は1炉代補修なしで使用可能である。この改造により、回収ガスの燃焼率は、4%から2~3%と極限に近い値まで減少し、ガス回収原単位は、6200 kcal/t 向上した。

3.3.4 回収ガスのエネルギーバランス

Table 1 は底吹き転炉と上吹き転炉の回収ガスの平均的な組成を示したものである。底吹き転炉ではCOガス濃度が高いため、ガス燃焼熱量が高い。Fig. 9 は、底吹き転炉の排ガスが保有するエネルギー(燃焼熱+顕熱)に対する回収エネルギーの割合を、前・後燃焼期を含む全吹錬時間の平均値で示したもので

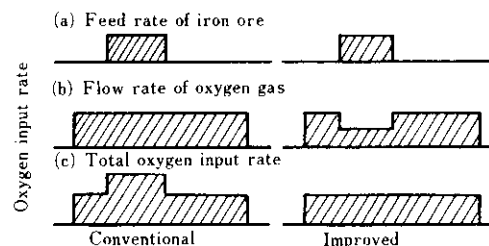


Fig. 7 Improved blowing schedule to stabilize the pressure fluctuation in the hood

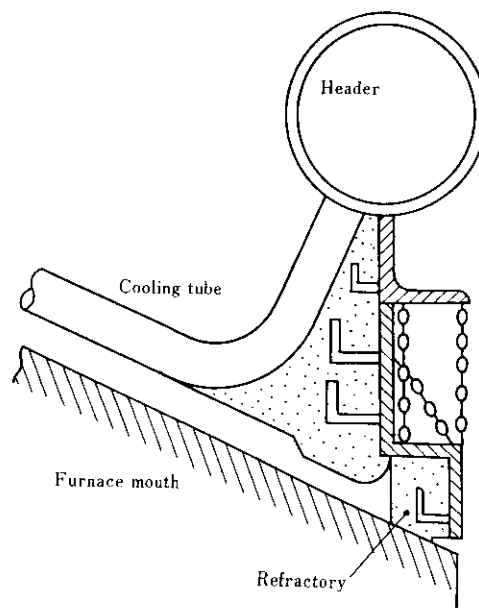


Fig. 8 Schema of new sealing device

Table 1 Typical gas composition recovered from Q-BOP (vol.%)

	CO	CO ₂	H ₂	N ₂
Q-BOP(Improved)	85.6	2.6	5.9	5.9
Q-BOP(conventional)	73.5	6.2	6.0	14.3
LD(Chiba)	64.5	18.4	0.7	16.4

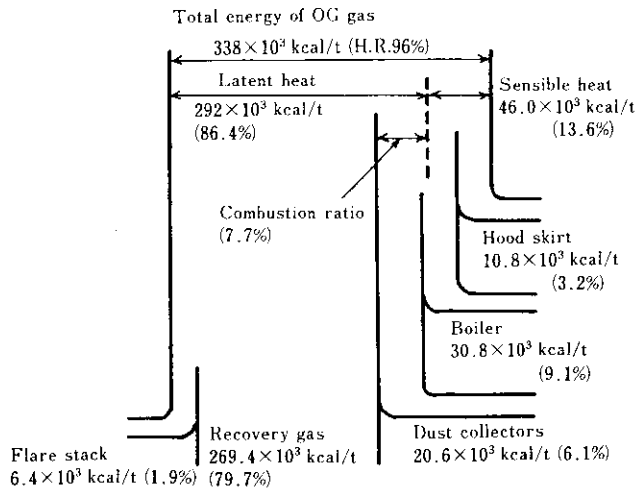


Fig. 9 Averaged heat balance of OG gas through blowing period

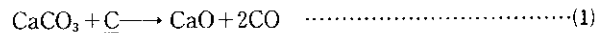
ある。排ガスの燃焼率は上吹き転炉の場合の22.2%に比較して、底吹き転炉では7.7%と低い値が得られる。また排ガス保有エネルギーの79.7%をガスで回収しておりボイラーによる蒸気エネルギー回収率9.1%を加えると、88.8%に達する。

Fig. 10 に回収中のエネルギーバランスの実測例を示す。燃焼率は3.0%と低く、排ガス保有エネルギーの85.4%をガスで回収しており、蒸気による回収を合わせると91.7%を回収している。

3.4 石灰石吹込みによる排ガス回収量の増大⁴⁾

転炉排ガスエネルギーを効率よく回収する考え方を発展させ、転炉-ガス回収設備をエネルギー変換装置として利用する方法が試みられている⁵⁾。底吹き転炉に石灰石を吹込むテストもこのような考えに基づいて行ったものの1例であり、(1)式の反応

によって生ずるCOガスを回収する技術である。



3.4.1 実験方法

本実験に使用した石灰石と、従来から使用している生石灰の化学成分をTable 2に示す。炉底から吹込む生石灰の一部をCaO量が等価となる石灰石と代替して、酸素気流により溶鋼に吹込んだ。生石灰および石灰石の吹込みパターンをFig. 11に示す。石灰石の吹込みは、排ガス回収中に行った。

3.4.2 排ガス回収量の増大

石灰石吹込みによる排ガス回収量の増加分計算値を実績値と比較してTable 3に示す。実績値は計算値の95.8%に相当する。

3.4.3 石灰石吹込みの転炉操業への影響

石灰石吹込みを実操業で長期間にわたって実施し、石灰石を使用しないヒートと比較した。Table 4に、石灰石を10 kg/t吹込んだ場合の溶鋼歩留、鉄鉱石、吹錬酸素、排ガス回収、生石灰各原単位の変動量を示す。石灰石の分解吸熱反応により、冷却剤として投入される鉄鉱石の添加量が減少し、鉄鉱石の直接還元によるメリットは減少する。また、石灰石吹込みの場合、トータルCaO量(生石灰と石灰石中のCaO分)を減らすことができた。この理由は、Fig. 12に示すように、石灰石を吹込んだ

Table 2 Composition of burnt lime and limestone (wt.%)

	CaO	CaCO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P	S
Burnt lime	97	1.7	0.36	0.001	0.01	0.01
Limestone	(55.6)	99	0.20	0.03	0.01	0.01

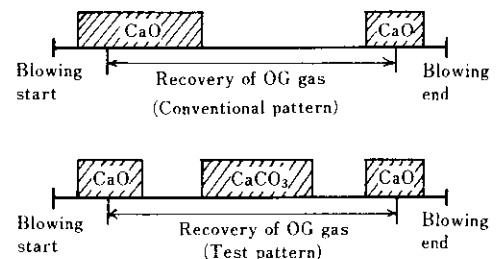


Fig. 11 Flux injection pattern

Table 3 Effect of injection of 10 kg/t-steel of limestone on OG gas recovery

	Calculated	Observed
OG gas recovery (kcal/t)	+6.78 × 10 ³	+6.50 × 10 ³

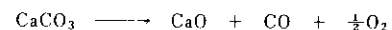


Table 4 Advantage and disadvantage of injection of 10kg/t-steel of limestone in Q-BOP

	Calculated	Observed
OG gas recovery	+6.78 × 10 ³ kcal/t	+6.50 × 10 ³ kcal/t
Burnt lime consumption	-5.6 kg/t	-7.6 kg/t
Ore consumption	-8.2 kg/t	-6.9 kg/t
Yield of molten steel	-0.57 %	-0.40 %
Oxygen consumption	+0.60 Nm ³ /t	+0.35 Nm ³ /t

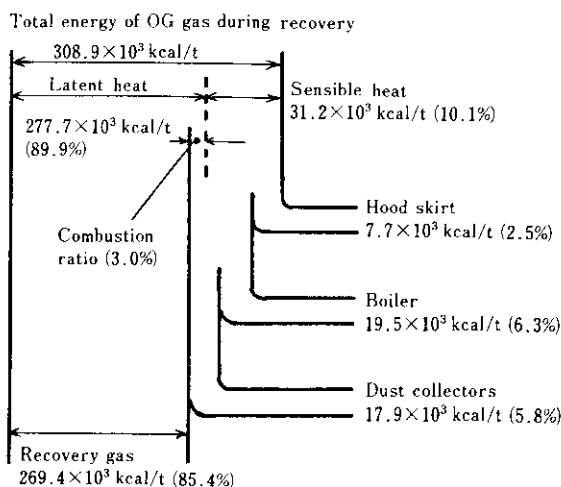


Fig. 10 Heat balance of OG gas during recovery period

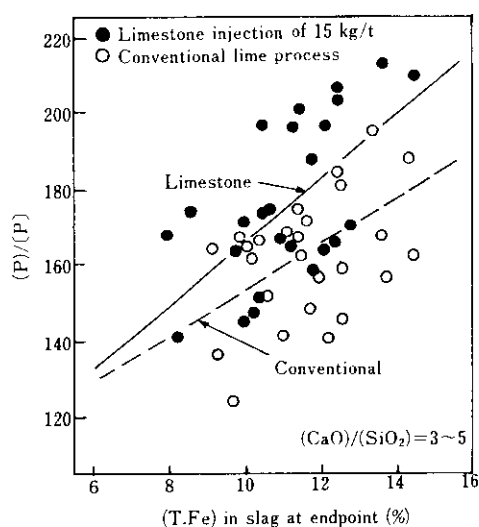


Fig. 12 Effect of limestone injection on phosphorus partition ratio at endpoint

場合、従来の生石灰のみの吹込みと比較して、脱磷能が向上するためである。石灰石吹込みの得失は Table 4 の各副原料およびガスの単価により決定されるので、その実施に際しては、製鉄所の立地条件やエネルギーバランスを考慮しなければならない。

4. 操業結果

昭和52年5月の操業開始以来、排ガス回収エネルギー原単位は、先に述べた種々の改善により、Fig. 13 に示すように逐次増加し、最近では 270×10^3 kcal/t、蒸気回収と合わせて 300×10^3 kcal/t を越えている。これは、千葉製鉄所全体の使用エネルギーの、3.4%に相当する。

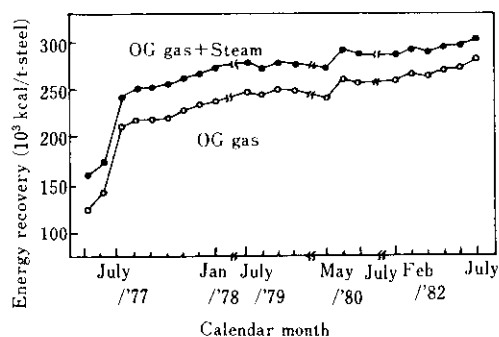


Fig. 13 Monthly variation of energy recovered from Q-BOP

5. 結 言

底吹き転炉の排ガス回収設備としてOG法を採用した千葉第3製鋼工場では、底吹き転炉の精錬特性を最大限に活かした排ガス回収操業技術の改善を行い、高いエネルギー回収率を実現した。主な改善は次の3点にまとめられる。

- (1) 炉口とスカート部の間隙をほぼ完全に密閉することによる燃焼率の低減。
- (2) 不活性ガス層を確実に作り、かつ、早期に回収条件が成立するような吹錬パターンの開発による回収時間の延長。
- (3) ガスサンプリング、ガス分析時間の短縮による回収時間の延長。

その結果、ガス回収原単位は 270×10^3 kcal/t にまで到達し、上吹き転炉に対する底吹き転炉の経済的優位性が一段と高くなった。

また、排ガス回収中の石灰石吹込み実験の結果によれば、石灰石から発生するCOガスはほぼ完全に回収できることが判明した。

参 考 文 献

- 1) 前原繁, 高橋正幸ら: 製鉄研究, (1977) 291, 89
- 2) 田中功, 藤井義博ら: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 229
- 3) 永井潤, 数土文夫ら: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 592

- 4) 小高幹男, 森下仁ら: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 240
- 5) 田上豊助, 岡村祥三ら: 鉄と鋼, 68 (1982) 4, S 76