

コークスベッドの活用による転炉内 100% スクラップ溶解法

平田 武行*・石田 博章*・姉崎 正治*²

Scrapmelting Process in Steelmaking Converter Using Coke Bed

Takeyuki HIRATA, Hiroaki ISHIDA and Shouji ANEZAKI

Synopsis :

A steel production process with 100% scrap using a combination-blown converter was developed to utilize small converters, which tend to be out of operation under recent economical situations, and to improve flexibility of steel production. This process does not use hot metal. Instead of hot metal, it utilizes coke bed, which is formed initially on the bottom of a converter. It uses only coke as fuel, and uses nearly the same facilities as an ordinary steelmaking converter.

Experimental results in a converter for a 10t melt were as follows :

- (1) Bottom blow equipment for oxygen was indispensable for this process. However, requisite ratio of bottom blow oxygen was 15%. The same facilities as a steelmaking converter were confirmed to be usable.
- (2) The ratio of initially charged coke to the total amount of coke affected the whole heat efficiency of this process. When the ratio increased, perfect burning of coke promoted naturally. The higher the ratio, the lower the consumption of coke.

It was thought that the bottom blow oxygen was necessary to improve the reaction ratio of oxygen with coke, and that the effect of the initially charged coke was in agreement with thermodynamical conditions.

Key words : steelmaking ; coke ; scrap ; converter ; post combustion ; flexibility.

1. 緒 言

鉄鋼業には、生産量により収益が大きく影響される体質がある。激しい経済情勢の変動に対応するためには、今後いっそう柔軟な生産構造に変革していかねばならない。また、厳しい国際競争に勝ち抜くためには生産の集約も図らねばならず、比較的規模の小さい転炉が休止される傾向にある。これらの転炉の活用を図ることは重要な課題である。

一方原料面から見ると、年々老廃スクラップの発生量が増えている。しかし対粗鋼スクラップ原単位は上昇しているにもかかわらず、転炉におけるスクラップ消費量は減少している¹⁾。これは溶銑予備処理の普及に一因があるが、電気炉との競争・共存も考慮に入れて、転炉のスクラップ消費のあり方を再検討すべき時期にきていると考える。

これらの状況を踏まえて、著者らは転炉でのスクラップ使用量の増加方法をまず検討した。転炉に溶銑と共にコークスを入れて、スクラップ使用率を高める方法は古

くから行われてきた²⁾³⁾。また最近でも、KS/KMS法のように底吹き羽口から微粉炭を吹き込み、かつ二次燃焼率を高めて燃料原単位を下げる方法や⁴⁾、KVA法のように天然ガスをバーナーのように使う方法⁵⁾などが開発されている。しかし著者らは、設備やプロセスの柔軟性をいっそう重視し、単純な設備で通常の製鋼用転炉と互換性があること、溶銑が無くても操業できること、しかも極力燃料原単位を低くできること等が必要と考えた。そして製鋼用の複合吹錬転炉を用い、溶銑の代わりにコークスベッドを活用する、新しいスクラップ溶解法の開発に着手した^{6)~8)}。

従来の、溶銑と共にコークスを使用する方法と比較しつつ、この方法によるスクラップの溶解結果と特性を以下に報告する。

2. 実験方法

実験には 10 t 試験転炉を用いた。Table 1, Fig. 1 に、それぞれの実験条件および設備概要を示す。

転炉の炉内容積は、れんが積み直後には 5.6 m³ だっ

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 9 日受付 (Received Mar. 9, 1990)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Oaza-Hikari Kashimamachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314)

*2 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

たが、実験回数を重ねるにつれて大きくなり、最終的には2倍程度に広がった。酸素は主として上吹きランスから供給したが、底吹き羽口も補助的に使用した。上吹きランスの先端位置は、炉口高さ近辺を中心にして、炉内へ1 m 程度までの範囲とした。コークスには、高炉用の小サイズ品を使い、乾燥等の事前処理はしなかった。付着水分は、実験の都度測定したが、おおむね3~5%だった。スクラップには製鉄所内で発生するピレットやブルームの切断くずを用いた。炉上からは投入できなかったため、専用シュートにより通常の実用転炉と同様な方法で、転炉を傾けて2~3 t ずつ分割投入した。

実験手順は、まず転炉を約20 h かけてれんが表面が1000°C になるまで予熱した。次に、炉上からコークスを400~1200 kg 投入し、底吹き酸素200~400 Nm³/h

Table 1. Experimental conditions.

Item	Content
Volume	5.6 m ³ (After lining)
Top-blown oxygen	Number of lance nozzles : 6 Jet direction : 10° from the vertical Flow rate : 1000~1400 Nm ³ /h
Bottom-blown oxygen	Number of tuyers : 2~4 Flow rate : 0~800 Nm ³ /h
Coke	Consumption : 1~3 t/heat Size : 20~25 mm Chemical composition (wt%) Fixed-C 88 Ash 11.4 Accompanied H ₂ O 3~5
Scrap	Consumption : 7~10 t/heat Size : about 200×200×200 mm (Crop ends from billets and blooms)

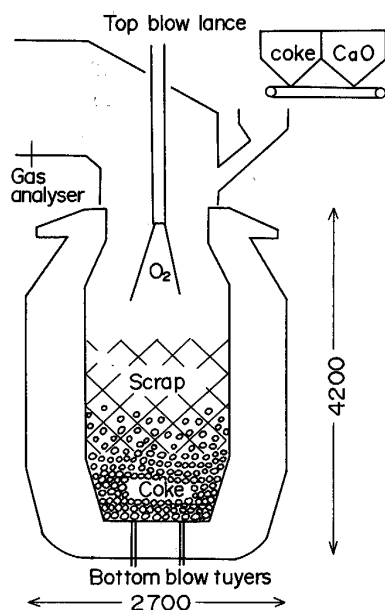


Fig. 1. Schematic drawing of an experimental combination-blown steelmaking converter for a 10 t melt.

で着火させた。コークスの表面が赤くなってから1回目のスクラップを装入し、底吹き酸素に加えて上吹き酸素500~600 Nm³/h も使用した。2回目のスクラップは数分後に送酸を中断し、炉傾動をして装入した。この後も同様な操作を繰り返し、所定量のスクラップが入り終わった段階で酸素供給速度を全体で1200~1800 Nm³/h へ上げ、本格的なスクラップ溶解工程を開始した。実験条件によりコークスを追加する場合には、送酸を継続したまま100 kg/min の速さで、炉上から連続的に投入した。炉の予熱完了からスクラップの装入完了までの時間は、スクラップシュートの吊り替えに伴う酸素供給停止時間も含めて、40 min~60 min だった。

本格的な溶解工程に入った後は、後方煙道に設けた排ガス分析計 (CO および CO₂ は赤外線式、O₂ は磁気式) によりコークスの燃焼状況を刻々監視し、炉内状況を推定すると共に、適時に炉内観察を行ってコークス残留量やスクラップの溶解状況をチェックした。また耐火物保護の観点から、スラグ中の CaO と SiO₂ の重量比が2になるように、コークス燃焼量に合わせて生石灰を炉上から連続的に投入した。この溶解工程には、通常30 min~60 min を要した。

以下のデータ中、特に断らない限り、コークス重量は付着水分込みであり、コークス原単位はスクラップ装入 t あたりで、スクラップ溶解完了時点でのメタル性状を1500°C、[C]=2.5% に統一したときの値を表す。

3. 実験結果

3.1 溶解結果

Table 2 に本法での溶解結果を示す。脱硫・脱窒を考慮して、溶解後の[C]は2.5%以上とした。溶解後の目視観察で炉内にコークスがほとんどなくても、[C]は確保できた。[P]はスクラップ中の[P]が低く、炉内インプット量が少ないために低レベルになった。脱硫は、実操業では炉外でも可能だが、ここでは加炭あるいはAl添加により行った。その後除滓し、引き続き脱炭した。[N]は脱炭に伴って通常の溶銑を用いたときと同程度まで下がり、鋼質としては総じて通常の転炉鋼なみのものを得ることができた。

3.2 炉内のガス発生状況

Fig. 2 に、本法においてスクラップ装入前にコークスを全量炉内に投入したときの排ガス発生状況の一例を示す。炉口からの空気巻込みの影響は、後方煙道での排ガス分析値を、酸素の物質バランスにより補正して排除した。本実験条件では、溶解工程の前半にはCOは発生しなかった。この期間の長さは実験条件により変化した

Table 2. Metal temperature and chemical composition.

	Temp. (°C)	[C] %	[P] %	[S] %	[N] %	(T. Fe) %
At melt-down	1 500~1 600	2.5~4.0	0.005~0.015	0.080~0.120	0.007~0.014	5.0~12.0
After desulfurization and decarburization	1 630~1 680	0.03~0.08	0.008~0.012	0.010~0.004	0.001~0.002	10.0~15.0

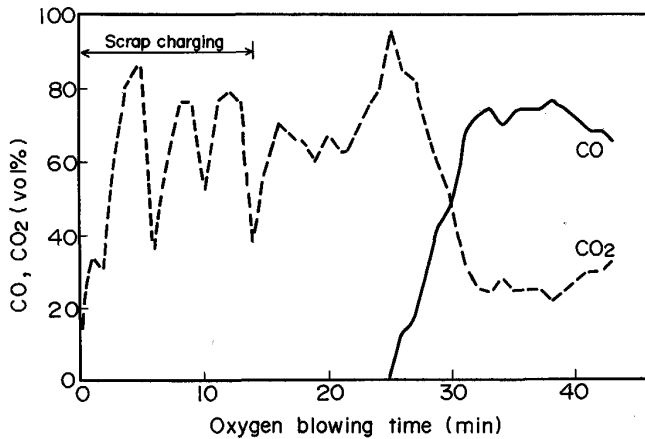


Fig. 2. Changes in gas composition in the experimental converter during scrap melting without hot metal.

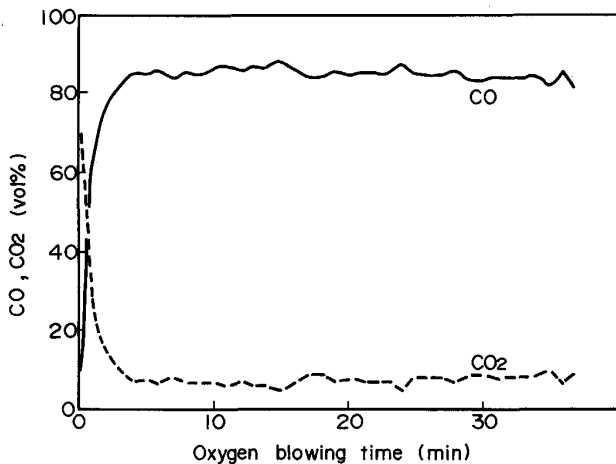


Fig. 3. Changes in gas composition in the experimental converter during scrap melting with hot metal by a convention process.

が、各実験に共通してこの間の炉内反応は穏やかだった。後半になって CO が出始めると、ダストの発生量が多くなり、スピittingが観察されるなど、外観的にしだいに溶銑を用いる通常の製鋼吹錬に近づいた。

一方 Fig. 3 には、比較のために従来の方で、溶銑にコークスを加えつつスクラップを溶かした場合の作業結果を示す。この作業条件は、10 t 転炉においてスクラップ 5 t に溶銑 5 t を加え、上吹き酸素 1 200~1 600 Nm³/h で吹錬したものである。このような条件では吹錬時間は長くなったが、ガス発生状況は通常の場合(ス

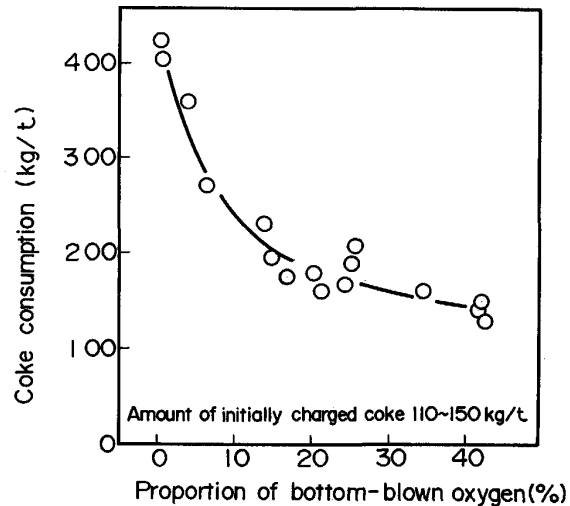


Fig. 4. Influence of proportion of bottom-blown oxygen on coke consumption up to the melt-down.

クラップ使用量 1 t 程度)と同様で、吹錬開始後少し遅れて CO が出始め、以後 CO が中心になって継続的に発生した。吹錬の状況も通常の場合と変わらなかった。

3.3 コークス原単位におよぼす作業条件の影響

本法において通常の複合吹錬転炉との互換性を重視しても、底吹き酸素の供給能力についての指針は必要である。コークスの投入条件を一定にして、底吹き酸素の供給条件が本法に与える影響を調査した。底吹き酸素流量が多すぎると、コークスが炉外へ飛び出すことがあり、飛び出さない範囲で実験を行った。

Fig. 4 に、スクラップ装入前に入れたコークス量(以下、初装入コークス量とする)を、スクラップ 1 t 当たり 110~150 kg にし、残りは溶解工程中心に分割投入したときの、酸素底吹き比率(底吹き酸素使用量/全酸素使用量)がコークス原単位に与える影響を示す。

10 t 転炉では、酸素底吹き比率が 15% 付近までは、1% 上昇するとコークス原単位が 15 kg/t 減少する大きな効果があった。この間で酸素底吹き比率が低いほど、酸素供給開始後に 5~10 min、未反応酸素が排ガス中に残留する傾向があった。15% より底吹き比率が高い条件では、排ガス中の未反応酸素は酸素供給開始後 5 min 以内に解消し、底吹き比率の上昇効果は 1% あたりコークス原単位 1~2 kg/t の減少になった。

Fig. 5 に初装入コークス比率(初装入コークス量/全

装入コークス量)がコークス原単位に与える影響を示す。ここでの酸素底吹き比率については、Fig. 4で変化の影響が少なかった、15~45%の範囲のデータを記入した。初装入コークス比率を1%上げると、コークス原単位が1.3 kg/t下がる効果があるとわかった。初装入コークス比率を変えることは設備的対応を特に必要としないため、広範囲にわたる調査が可能で、全体としては130 kg/tにも及ぶ大きな影響を確認した。

Fig. 6に、スクラップ装入開始から溶解完了までの1ヒート平均の完全燃焼率と初装入コークス比率との関係を示し、Fig. 7には、Fig. 6に対応させて、熱効率と初装入コークス比率との関係を示す。完全燃焼率および熱効率は次のように定義した。

$$\text{完全燃焼率} = \{CO_2\% / (CO\% + CO_2\%)\} \times 100$$

$$\text{熱効率} = \{溶銑含熱量 / COとCO_2の発熱量\} \times 100$$

初装入コークス比率を高めると、完全燃焼率は上昇し

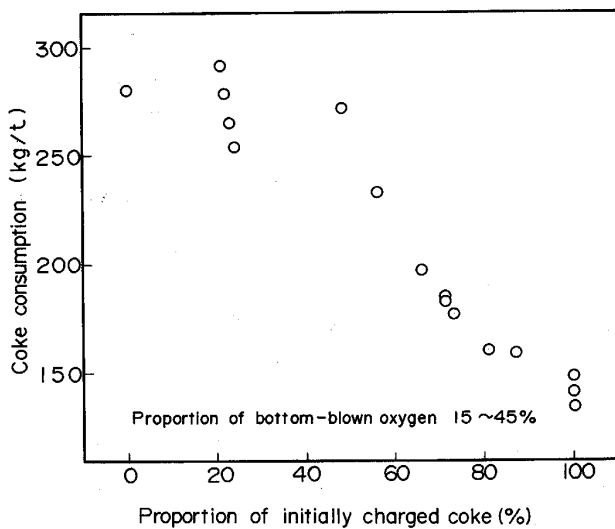


Fig. 5. Influence of proportion of initially charged coke on coke consumption up to the melt-down.

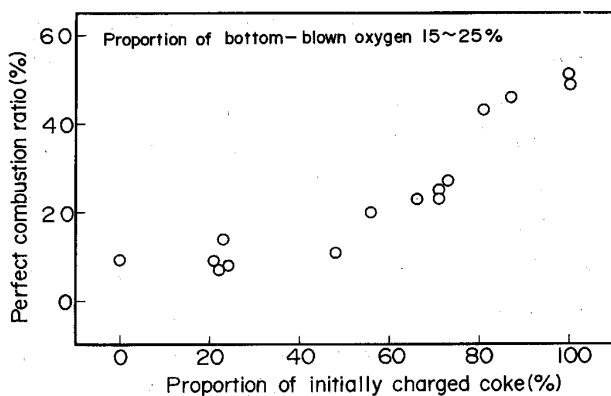


Fig. 6. Perfect combustion ratio as affected by the proportion of initially charged coke.

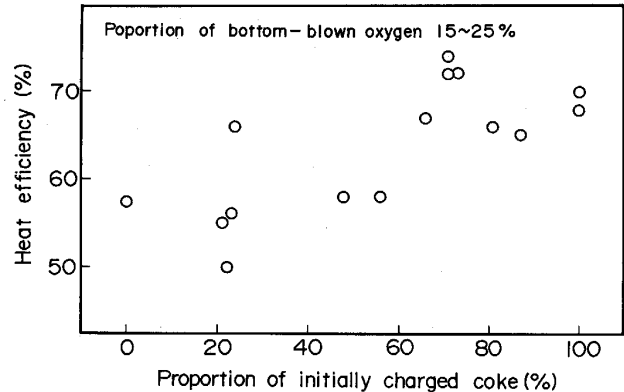


Fig. 7. Heat efficiency as affected by the proportion of initially charged coke.

た。しかも熱効率も、上昇傾向にあった。したがって、初装入コークス比率の上昇によるコークス原単位の減少効果は、主としてコークスの完全燃焼率が高まることに原因があるが、この高い熱発生量をスクラップに有効に伝えることができる点で、伝熱機構も良好なためとわかった。

3.4 従来法と本法とのコークス原単位の比較

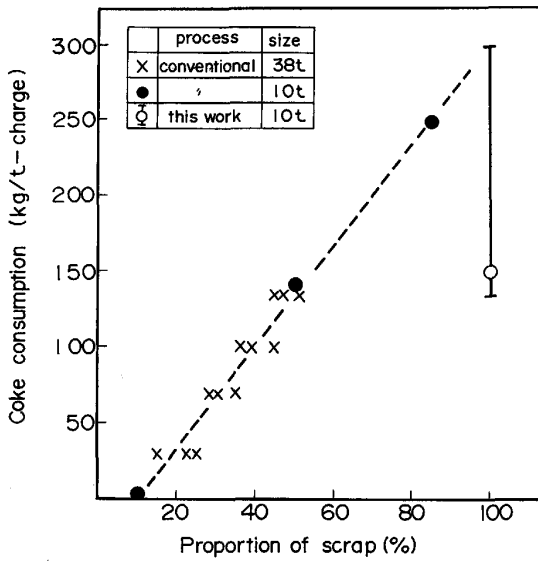
転炉製鋼法のスクラップ使用比率 {スクラップ量 / (スクラップ + 溶銑量)} は平均 10% 程度であり、これにコークスを熱源として加えてスクラップ使用比率を高める方法は、昔から行われてきた。この方法を以後、従来法と呼ぶ。この従来法においても、初装入のスクラップおよび溶銑量を共に減らして吹錬を始め、以後スクラップとコークスとを適当に加えつつ吹錬を続けければ、理屈上限りなくオールスクラップ操業に近づく。

Fig. 8には、先行文献データ²⁾を含めて、従来法でのスクラップ使用率とコークス原単位との関係を示す。図中には、比較のために本法のコークス原単位も併記した。この図に限り、コークス原単位はスクラップと溶銑との合計重量に対する原単位を表す。従来法では、広範囲にわたってみかけ上直線的関係(スクラップ使用比率 3%あたりコークス原単位 10 kg/t)があった。しかし本法のコークス原単位は、その直線的関係をスクラップ使用比率 100% まで外挿した値より低かった。

4. 考 察

4.1 溶解進行経過の推定

従来法では、Fig. 3に示したように、酸素供給期間の初期からCOが発生した。これは通常の転炉吹錬と同様であり、上吹き酸素は最初から溶銑と反応して高温の火点を形成し、溶銑を加熱する。そしてスクラップは、加熱された溶銑に徐々に溶かされていくと考えられる。



X : After AOYAMA²⁾

Fig. 8. Consumption of coke per total weight of scrap and hot metal related to proportion of scrap and scrapmelting process.

しかし本法では、装入物はすべて常温からスタートしている。酸素はまず衝突点でコークスと反応し、そのコークスを加熱した後、排ガスとなって周囲のスクラップおよびコークスを一緒に加熱する。しかしある段階からは溶融物ができて、従来法と類似の溶解プロセスに移行すると考えられる。そこでどの時点から溶解が進行しているのかを、10 t 転炉で Cu をトレーサーにして調査した。このときの初装入コークス比率は 40~50% である。

Fig. 9 に、酸素供給時間全体中の経過時間率とスクラップの溶解比率との関係を示す。溶解比率は後半になってから上昇しており、前半には溶融物は存在しなかった。これは従来法のように初期から局所的に高温部ができるのではなく、コークスを含めて全体が徐々に加熱された後、スクラップが溶け始めたことを示している。

4.2 酸素底吹き比率の上昇効果

Fig. 4 に示したように、本法では酸素底吹き比率を上げるとコークス原単位が減少した。特に底吹き比率 15% 付近までは酸素底吹き比率の上昇効果が大きかったが、これは酸素供給開始後に排ガス中に未反応酸素が混じる期間が、底吹き比率上昇に伴って短くなったことに関係すると考えられる。

本法の送酸初期において、底吹き酸素は上吹き酸素に比べて次の特長があると考えられる。

(1) 初期には、底吹き酸素の方がコークスとの反応効率が低い。

本法では、初期に多量のコークスを炉内に投入するた

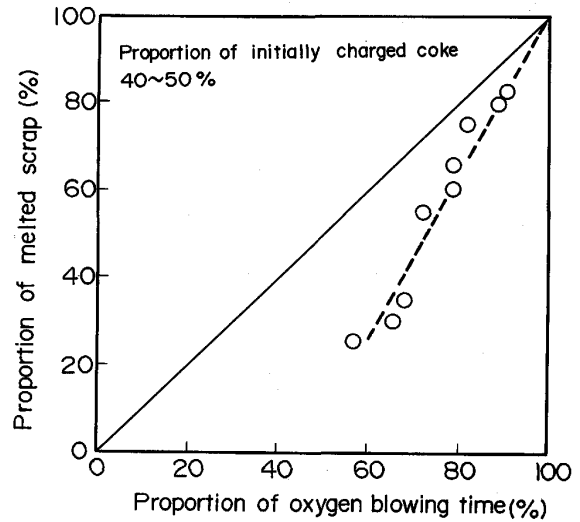


Fig. 9. Course of proportion of melted scrap.

め、コークスは炉底に多く存在する。しかし初期にはスクラップも多いために、上吹き酸素は十分には炉底まで到達せず、コークスとの反応率が不十分になる。

(2) 上吹き酸素だけより酸素供給路を増やし、熱効率を高める。

上吹き酸素は、耐火物溶損防止の観点からそのジェットの広がり角度を制限する必要があり、炉壁近傍の装入物を加熱しにくい。しかし底吹き酸素なら、適正な羽口配置により可能である。また、均一に炉内を加熱する上でも、酸素供給路は多い方が都合がよい。

しかし溶解期の後半には、炉内装入物の高さが下がり、かつ全体に温度が上がるために、上吹き酸素に対する底吹き酸素の特長が薄れる。特に溶銑が炉底にたまった後では、底吹き酸素は溶銑と反応して CO になり、全体としての完全燃焼率を下げるために、かえって都合が悪い。

本実験条件では、酸素底吹き比率 15% 付近を境にして、底吹き比率の上昇がコークス原単位におよぼす影響に変化があった。15% までは送酸初期に酸素反応効率を改善する効果の影響が強く、15% 以上では酸素反応効率の方は十分になり、熱効率や完全燃焼率変化の影響が強くなった結果と考えられる。

酸素底吹き比率を上げることは、コークス原単位の減少の外、設備的負担の増加や、底吹きによるコークスおよび溶融物の飛び出しも伴う。このためこの比率には、転炉形状等の操業条件に応じて適切な値があると考えられる。

4.3 熱効率

Fig. 6, 7 に示したように、酸素底吹き比率 15~25%

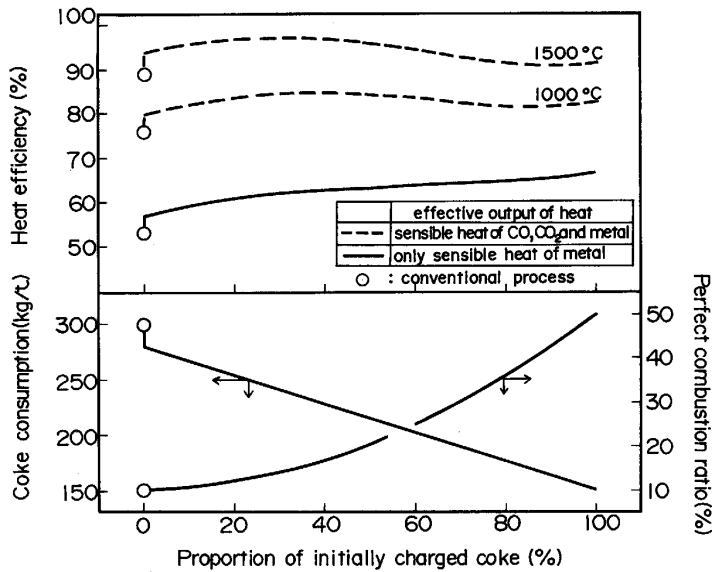


Fig. 10. Effect of change in temperature of exhaust gas on calculated heat efficiency related to proportion of initially charged coke. Perfect combustion ratio and coke consumption are assumed to be as shown in the lower part of this figure.

では初装入コークス比率を上げると完全燃焼率が高まり、同時に熱効率も高まる傾向があった。ただしこの熱効率は溶銑の含熱量のみを有効とし、排ガスのもって逃げる顕熱や潜熱が変化することの影響は考慮しなかった。本法の目的がスクラップの効率的溶解にあり、排ガス顕熱やその潜熱の利用は対象外のためである。しかし初装入コークス比率の上昇に伴って排ガス発生量が減少し、かつその組成も変化している。全体の熱効率を考える上では、排ガス顕熱の熱効率への影響を把握しておくことは有用である。Fig. 10に、この影響を計算により示す。

Fig. 10 下部のように、コークス原単位と完全燃焼率とを実験結果に基づいて模式化した。実際の燃焼カーボン量が、メタルの[C]上昇およびダストロスにより、炉内投入量より平均的に30 kg/t少ないことを考慮すると、Fig. 10 上部のように熱効率が定まる。この実線はFig. 7に示したと同じ、溶銑含熱量のみを考慮した熱効率であるが、破線はおのおの1500°C、1000°Cを仮定した排ガスの顕熱も有効側に入れてある。

他に考慮すべき熱量には、炉体への蓄熱、スラグ、羽口保護ガス(N₂)等がある。炉体への熱ロスは熔融メタルの存在時間に比例するとして、炉体への熱ロスをFig. 9のような溶解推移、および溶解完了後の送酸停止中メタル温度の低下速度(8~10°C/min)から求め、スラグおよび羽口保護ガス等への熱ロスをスラグの含熱量(1883 J/g)や各物質の比熱⁹⁾から求めると、これらの熱ロスの合計は、初装入コークス比率に関係なく全発熱量の12~15%になった。Fig. 10の熱バランスから考えると、本法における排ガスの平均温度は、初装入コークス比率にかかわらず1200°C程度になる。

本法では、スクラップ全量を最初に炉内に装入するために、Fig. 9からわかるように、それらが加熱前半には積み重なったまま存在する。このため燃焼ガスとスクラップとの熱交換率が良い。しかも初装入コークス比率を高めることにより完全燃焼率が上昇し、排ガス発生量が減少している。この間、排ガスの平均温度は1200°C程度と一定であることから、排ガスへの熱ロスは減少していると分かった。

溶銑にスクラップを溶かし込む従来法との比較では、従来法の溶銑温度は常時1400~1500°Cあり、排ガス温度は1400°C以上あると考えられる。しかもコークスの完全燃焼率は10%程度と低いためガス発生量が多く、排ガスへの熱ロスは本法よりも多いと考えられる。

このように本法は、スクラップとガスとの熱交換率および排ガス発生量の両面で、熱効率的に従来法より優れていると考えられる。

4.4 完全燃焼率向上とコークス原単位の低減

熱力学的には、コークスに酸素を吹き付けると、低温ではCO₂が、高温ではCOが発生する。この境界は約705°Cである。ただしコークスが無い条件(炉内上部等)ではCOの二次燃焼が考えられるため、酸素の供給方法の影響を受け得る。しかしいずれにしろ、炉内が低温ほどCO₂になりやすく、コークス原単位を低減する上で有利であると考えられる。

Fig. 11には、Fig. 2に対応して、溶解時間の進行に伴う完全燃焼率および炉内平均温度の推移の計算結果を示す。温度の推定にあたっては、溶解の全期間にわたって一定の熱効率(このヒートの平均熱効率=71%)を用い、20sごとに物質バランス、各物質の比熱、酸化発熱量を求めて、炉内装入物の平均温度を算出した。実際

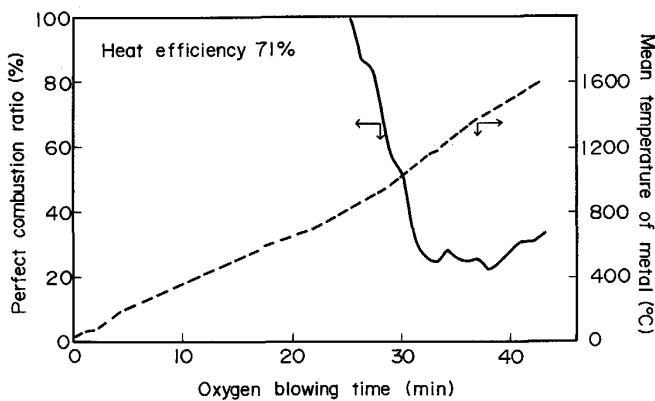


Fig. 11. Courses of perfect combustion ratio and estimated mean temperature in the converter. Heat efficiency was assumed to be almost constant during whole oxygen blowing time.

には、送酸初期には炉内装入物の温度が低いこと、および炉内装入物の積層構造の影響から熱効率は平均より高く、送酸末期には逆に熱効率は平均より低くなるという変化が考えられる。このため初期の炉内平均温度の上昇速度は、実際には Fig. 11 よりも速い可能性がある。

ヒート平均の完全燃焼率を上げるには、初期炉内の低温を利用し、前半の 100% の期間を長くすることが効果的だった。Fig. 11 では、完全燃焼率が下がり始める時点での炉内平均温度は、実際の熱効率変化も考慮すると 800°C 以上と考えられた。この場合、コークスの初期装入比率は 100% であり、コークスも含めて 800°C までは完全燃焼による加熱の恩恵に浴することができたといえる。

従来法のように初めから溶銑を入れると、酸素は主に溶銑と反応して CO になってしまう。したがって CO₂ の形成は二次燃焼に頼ることになるが、この効率を安定して高めることは、転炉の実操業例から見てもなかなか困難である¹⁰⁾¹¹⁾。本法では、比較的低温度での自然な完全燃焼を活用する点で、耐火物への悪影響を抑えつつ全体の発熱効率を高めることが可能であり、スクラップへの着熱効率も従来法より有利な結果、コークス原単位 150 kg/t (カーボン原単位換算で 127 kg/t) という良好な結果が得られていると考える。

5. 結 言

スクラップ発生量の増加に対処し、転炉をいっそう活用するための一方法として、転炉によるスクラップ溶解法を考案した。この特徴は、複合吹錬転炉でコークスベッ

ドを活用し、溶銑は一切使わない点にある。また生産の柔軟化を指向しており、通常の製鋼用転炉との互換性も重視している。

この方法を 10 t 試験転炉で実験した結果、次の結論を得た。

(1) 脱硫は別途行う必要があったが、製鉄所内で発生するスクラップを溶解することにより、総じて通常の転炉鋼並みの溶鋼が得られた。

(2) 必要設備としては、酸素を全酸素使用量の 15% 程度底吹きするだけであり、通常の複合吹錬転炉を流用できることが確認できた。

(3) 操業上は、酸素底吹き比率 15% 以上を確保した上で、コークスの初期装入比率を増やすことが、コークス原単位の低減に最も大きな効果があった。

(4) 本法の溶解進行過程は、常温状態からコークスと酸素とが反応し、コークス自体およびスクラップを徐々に全体的に加熱する。その後溶銑が形成され、以後はその溶銑と酸素とが反応する、通常の転炉吹錬に近いプロセスに移行するものと考えられた。

(5) 底吹き酸素は、初期装入コークスと酸素との反応率を高めるために必要であり、コークスの初期装入比率の増加は、初期炉内の低温状態を活用し、平均完全燃焼率を高めるのに効果があると考えられた。

(6) 本法によれば、いわゆるソフトブロー等の二次燃焼率を高める操作をしなくても、自然に完全燃焼率が高まる。しかも熱効率も炉内構造に基づいて高いために、溶銑にスクラップを溶かし込む従来法より効率的な操業が可能になると考える。

文 献

- 1) 林 高朗: 鉄鋼界, **38** (1988) 8, p. 29
- 2) 青山芳正, 白井弘治, 松永 昭: 鉄と鋼, **48** (1962), p. 1363
- 3) 松永吉之助, 古賀敬造, 中谷元彦: 鉄と鋼, **50** (1964), p. 403
- 4) L. V. BOGDANDY, K. SCHAEFER, K. BROTMANN and H. G. GECK: Stahl Eisen, **104** (1984), p. 1143
- 5) L. V. BOGDANDY, G. MITTER, A. MOSER and O. KOELLER: BHM, **134** (1989), p. 203
- 6) 丸川雄浄, 姉崎正治, 平田武行: 鉄と鋼, **71** (1985), S930
- 7) 多賀雅之, 丸川雄浄, 姉崎正治, 平田武行, 石田博章: 鉄と鋼, **73** (1987), S916
- 8) 石田博章, 丸川雄浄, 姉崎正治, 平田武行, 塩出純孝: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 245
- 9) 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (鉄鋼基礎共同研究会溶鋼・溶滓部会編) (1972), p. 177
- 10) H. SPERL: Stahl Eisen, **109** (1989), p. 253
- 11) 岡村祥三, 中島英雅, 丸川雄浄, 姉崎正治, 戸崎泰之, 森 明義, 加藤木健, 市原 清: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1787