論 説

UDC 669.184.244.62:669.14.018.8

星崎工場20tAODにおけるC-B法の開発

牛山博美*, 矢島忠正*, 北川修三*, 畑 浩巳*

Developments of C-B Process in 20t AOD at Hoshizaki Plant

Hiromi Ushiyama, Tadamasa Yajima, Shuzo Kitagawa and Hiromi Hata

Synopsis

AOD-C-B process was developed in 1978 and since then has been adopted for all AOD heats. The outline of the process is as follows; the secondary oxygen is blown from the top of the vessel to burn CO to CO₂ above the bath surface and the heat generated there is directly transferred to the bath being stirred vigorously by tuyere oxygen and inert gas.

The reduction of power and Si consumption and the improvements of the heat economy have been obtained with other operational advantages by this process in last two and a half years.

1. 緒 言

AOD プロセスは1968年に米国 Joslyn 社で採用されて以来、急激な普及を見せ、現在では世界各国70社余が保有し、今やステンレス鋼生産の主流の座を占めるに至っている。これは AOD プロセスの持つ以下の如き冶金学的特長に負う所が大きい。

- (1) 脱炭期に CO ガスの分圧制御を行うべく炭素濃度に応じ O₂ および不活性ガスの混合比率を容易に変化できる。
- (2) 脱炭期および還元期を問わず、浴面下羽口よりのプロセスガス吹込みに伴う強烈な浴攪拌は迅速かつ効果的な精錬を可能にしている。しかし AOD 精錬の熱源は全て C, Si, Mn, Cr, Fe の酸化反応熱で、このうち不純物として除去されるべき C のそれは $\frac{1}{4}$ にすぎず残りは Cr, Mn,

Fe のそれである。これら有価元素の酸化損失量は所謂 Cr 還元期に消費される Si 原単位として表わされる。この還元用 Si 原単位を低減させることは、ベッセル内で、C 以外の元素の酸化反応による熱量を減少させることに他ならない。このためには、低廉な代替熱源の確保あるいは精錬に必要な全熱量そのものの減少が不可欠である。

一方、これらのことが可能であるとすれば、Si 原単位の減少のみならず、AOD に溶鋼を供給しているアーク炉での熱原単位の減少も可能であることを意味している。即ち、アーク炉での出鋼温度を下げ、出鋼前の湯面平滑期における極めて効率の悪い電力を節減することが可能となる。特に近年のエネルギー危機に伴う電力単価の高騰を考慮すると、それが直接的な対応策となり得る。

Table 1 に数種の元素の酸化反応熱に関するエネルギー・コスト比較を示す。ここで C のエネルギー・コストは幅で示してあるが、合金からくる不純物の場合には単価を 0 とし、加炭剤を使用した場合その単価を用い、さらにこれらの燃焼に必要な

昭和55年12月5日 受付

*大同特殊鋼㈱星崎工場

O₂ ガスの金額も加味した形で算出した。Table 1より、CはAOD ベッセル内で使用でき得るエネルギーの中で、最も安価であることがわかる。しかしながら、もしC源が石炭の如き加炭剤であったならば、CのCO₂までの完全燃焼が実現できた時のみコスト低減が図れることになる。全ての製鋼プロセスにおいて、溶鋼中のCは燃焼してCOになり、2.79Mcal/C kgの熱を生成するが、それはC

の保有する化学熱のわずか1/3に過ぎない。古くはカルドー法およびローター法、新らしくはOBM-S法に見る如く、炉の中でCOをCO₂まで燃焼させることは困難ではない。しかし、問題は「2次燃焼によって生じた熱を炉耐火物の損傷を惹き起こすことなしに溶鋼に如何に伝えるか。」である。

1978年1月、著者らは星崎工場 20tAOD (Table

Table 1. Comparison of energy cost.

Elements & power	Oxide	$-\Delta H_{298}^{\circ}$ (Mcal/kg)	Required oxygen (Nm ³ /kg)	Relative energy cost
C	CO	2.20	0.93	0.5-1.6*
	CO ₂	7.84	1.87	0.3-0.6*
Si	SiO ₂	7.75	0.80	2.2
Mn	MnO	1.67	0.20	6.0
Cr	Cr ₂ O ₃	2.60	0.32	6.4
Al	Al ₂ O ₃	7.41	0.62	3.7
Fe	FeO	1.13	0.20	1.8
(Power)	—	(0.86Mcal/kWh)	—	1.0

* In case of carbuization by bituminous coal.

Table 2. Main items of our 20t AOD equipment.

Nominal capacity		15ton
Number of vessel		2 (one for operation, another for repair)
Tilting device		Mechanical system
Vessel supporting form		Trunnion type
Vessel	Max diameter × total height	3 040 × 4 600mm
	Thickness of iron shell	32~50mm
	Number of tuyeres	2
Gas system	Oxygen	15±1 kg/cm ² 1 200Nm ³ /hr max 99.6%
	Argon	15±1 kg/cm ² 800Nm ³ /hr max 99.99%
	Nitrogen	15±1 kg/cm ² 800Nm ³ /hr max 99.99%
	Dry air	7 kg/cm ² 300Nm ³ /hr max Dp. < -40°C
Supplier		Takakura Works in Daido

2に設備諸元を示す。)において新プロセスを開発し、AOD-カウンター・ブロー法(AOD-Counter-Blow法、以下省略しC-B法と称する。)と名付けた。本法の特色はFig. 1に示すように O_2 の上下吹きにある。即ち、ベッセル上部より2次 O_2 ガスが供給され、浴上方でC Oを CO_2 まで燃焼させる。そこで生成した熱は羽口からの O_2 および不活性ガスによって生じている溶鋼の激しい攪拌を介し、直接溶鋼へ伝播される。なお、本法の実操

Fig. 1. Counter-Blow (C-B) process.

業への適用はC O発生量および鋼浴攪拌が最大である脱炭期第1ステップ(鋼浴中C%0.30%まで)に限定し、1978年5月より実施している。

本報では、2年余にわたる本法の実操業における熱経済性の改善効果および冶金学的特長につきとりまとめる。

2. 試験結果

2.1 予備試験結果

Fig. 2に脱炭期第1ステップで5 min間C B法を実施した時の実炉試験溶解におけるC濃度および鋼浴温度の推移を示す。C B法実施時に昇温速度および脱炭速度の顕著な増加が認められる。2次 O_2 ガスの一部が脱炭速度を $0.032\%/min$ 、即ち58%増加させるのに使用されていることがわかる。またCRE(Carbon Removal Efficiency)が90%まで改善され、さらに昇温速度が2.5倍に増加している。これは $CO-CO_2$ の2次燃焼熱の大部分が溶鋼に伝播されているためと考えられる。事実、廃ガス分析でも約20%程度C Oが CO_2 に燃焼されているのが認められている。ここで、単位脱炭量当りの昇温速度 dT/dC は通常法の $127^\circ C/\%C$ からC B法実施には $195^\circ C/\%C$ まで上昇しているが、この dT/dC は dT 項に金属酸化による昇温が常に含まれているため、見掛けの数字として見なすべきである。

Fig. 2. Experimental result of a C-B heat.

Period	dT/dt $^\circ C/min$	dC/dt $\%C/min$	dT/dC $^\circ C/\%C$
1	7.0	0.055	127
2	17.0	0.087	195
3	7.0	0.055	127

2.2 5 min 間試験時の部分ヒート・バランス

Fig. 3 に Fig. 2 と同じ結果から C B 法および通常法実施時の単位時間当りの熱的变化分をヒート・バランスとして示す。これは、C B 法の効果を明確にするために計算したもので、廃ガス中の CO の化学熱は省略してある。CB 法実施時の Input 項に不明分 0.58 Mcal/t・min が存在するものの、上吹き O₂ により 2.09 Mcal/t・min の熱が系内に富化されていることがわかる。このうち 0.86 Mcal が脱炭速度増加分で 1.23 Mcal が 2 次燃焼によるものである。通常法実施時、2.12 Mcal/t・min の発熱があり、1.36 Mcal が溶鋼とスラグに伝わり、熱効率は 64.1% となっている。ここで C B 法実施時にも羽口ガスによる熱効率が同じとすると、上吹き O₂ による 2.09 Mcal の富化熱は 1.94 Mcal の有効熱となることを意味している。この場合 C B 法の熱効率が 92.8% と高過ぎるように見えるが、CO の顕熱の取り扱いに問題があり、これを熱効率に算入すべきである。CO の顕熱を考慮して、この熱効率を算出すると 72.9% となり、通常法に比較し約 10% 程度高いことがわかる。

2.3 C B 法最適条件調査結果

Fig. 4 に見掛けの比昇温速度 dT/dC および金属酸化速度 (100-CRE) への上吹き O₂ 流量の影響を示す。

図中 dT/dC は O₂ 流量増加に伴い漸増しているが、(100-CRE) は 8 Nm³/min の上吹き O₂ 流量で極小点が認められる。ここで dT/dC の増加現象は、昇温速度 dT/dt の増加が脱炭速度 dC/dt の増加を上まわっていることを意味している。

上吹き O₂ 流量 8 Nm³/min 以下では、 dT/dC は漸増し (100-CRE) が 15% から 10% まで減少し

Fig. 4. Effect of top oxygen flow rate on specific temperature increase and metal oxidation ratio.

Fig. 3. Partial heat balance in 20ton AOD unit during 5 minutes C-B and subsequent conventional process.

ている。これは上吹き O_2 流量の増加に伴い、 CO_2 生成および熱伝播が増進していることを意味している。即ち、 CO_2 生成により形成される鋼浴面直上の極高温域が、著しく隆起している鋼浴面あるいは激しく飛散している粒滴からの脱炭を迅速に進行させ、金属酸化を抑制しているものと考えられる。さらに、CB法実施時のスラグ相は通常法の場合と同様に固体であり、それゆえスラグ中の酸化物と溶鋼中のCとの反応もまた迅速に進行し得ることも影響していると考えられる。

一方、上吹き O_2 流量が $8 \text{ Nm}^3/\text{min}$ を超えると、高流速の O_2 ガスが冷えている状態で CO_2 生成する前に直接溶鋼と接するため金属酸化をひき起こすと考えられる。実際に上吹き O_2 流量 $10 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の時、脱炭速度は $0.085\%/ \text{min}$ と $8 \text{ Nm}^3/\text{min}$ の時とほとんど変わらないにもかかわらず、 dT/dC は増加している。これは(100-CRE)で表わされている金属酸化増によるもので、 CO_2 生成の増加によるものではない。

従って、 $8 \text{ Nm}^3/\text{min}$ が当工場では最適として、この条件を実操業へ適用することとした。

3. CB法実操業適用結果

3.1 実操業適用例

Fig. 5 に304のCB法適用例を示す。CB法は1.57%から0.40%までのC濃度域で16min間実施されており、この間800kgの軽焼ドロマイトと400kgの高炭素Fe-Cr(52%Cr, 7.4%C, 2.6%Si)が添加されている。234kgのCおよび72kgのSiいずれも不純物であるが、これらの酸化反応熱を主体に240℃の温度上昇が得られている。CB法の最後の6min間には、昇温速度 dT/dt で $17.5^\circ\text{C}/\text{min}$ および脱炭速度 dC/dt で $0.093\%/ \text{min}$ が得られており、これはFig. 2の結果と概ね一致している。この後、合わせて1100kgのスクラップが添加されており、その結果Si原単位は $8.25 \text{ kg}/\text{t}$ となっている。1430℃という比較的低いスタート温度を考慮すると、これらの結果にCB法の効果が表われていると言える。一方、処理時間は試験目的で頻度高くサンプル採取を実施したにもかかわらず、67minと短い。通常作業時のサンプル採取は第1ステップ末、第2ステップ末、およびCr還元末のわずか3回に過ぎない。

Fig. 5. Typical heat log of 304 grade.

3.2 ヒート・バランス比較

Fig. 6 に304の通常法とCB法のヒート・バランスをton当りの形で表わし比較した。両者ともスタートC濃度およびSi濃度は各々1.55%および0.33%である。しかし、スタート温度とスタート時の溶鋼量は大きく異なっており、CB法の場合それぞれ1479℃および894kg、通常法の場合それぞれ1521℃および952kgとなっている。ここでCB法によるCOの2次燃焼比率を25%とした。

ベッセル内での発生熱量はCB法が $416.0 \text{ Mcal}/\text{t}$ 、通常法で $430.8 \text{ Mcal}/\text{t}$ であり、CB法実施時には $14.8 \text{ Mcal}/\text{t}$ の減少となっている。しかし、この内有効に使用された熱量はCB法で $362.8 \text{ Mcal}/\text{t}$ 、通常法で $364.7 \text{ Mcal}/\text{t}$ と当然のことながらほとんど変わらない。熱効率で見ると、通常法の84.7%に対しCB法では87.2%と増加している。Input項の減少分 ($14.8 \text{ Mcal}/\text{t}$) は熱ロスの減少に依るものと考えられるが、この熱ロスの減少はCB法による脱炭速度の向上および生産性の向上といったものが寄与していると推定される。加えて、ベッセル内の2次燃焼によって $18.0 \text{ Mcal}/\text{t}$ の熱が発生しているが、これは通常法では廃ガス中に浪費されていたものであり、これがCB法によりCの持つ化学熱の47%が活用され、通常法(活用率

Fig. 6. Total heat balance of 304 grade.

32%)に比較し15%向上していることになる。

通常法と比較し、これらを合わせた 32.8Mcal/t の熱利益自体が省エネルギーと見なし、これは 24.9 Mcal/t の溶鋼頭熱減少および 7.0Mcal/t の Si 酸化反応熱の減少につながっている。24.9Mcal/t の溶鋼頭熱はアーク炉の湯面平滑期における電力効率を40%とすると、72kWh/t に相当し 7.0Mcal/t の Si 酸化は 1.1kg/t の Si に相当する。C B 法における全 Si 原単位は 11.2kg/t であるが、このうち 3.3kg/t はスタート時の鋼浴成分と高炭素 Fe-Cr からのものであり、7.9kg/t がスラグ還元用である。

3.3 操 業 結 果

3.3.1 電力原単位実績

Fig. 7 に C B 法採用以降の全オーステナイト系ステンレス鋼の月間平均電力原単位および冷材使用量の推移を示す。第 1 段階には 1979 年 6 月までに 29kWh/t の低減が図れたが、これは 7% の冷材増加によるものである。第 2 段階には 49kWh/t という大幅な節減を達成したが、これはアーク炉出鋼温度を低下 (1630°C→1570°C) したためであり、これには移送用取鍋の保温、アーク炉作業の改善、および AOD 操業技術の改善などの要因も寄与していると言える。これらの期間中スタート C 濃度は 1.6% とほぼ一定であり、電力原単位は

Fig. 7. Change of power consumption and coolant addition.

1978 年 1 月以降 78kWh/t の節減をしており、現在では約 385kWh/t になっている。

3.3.2 Si 原単位および処理時間実績

Fig. 8 に Fig. 7 同じ鋼種および期間の Si 原単位および処理時間の推移を示す。Si 原単位は 1978 年の前半に 25% の低減が図れたが、その後主力を電力原単位低減に傾注したため約 9 kg/t のまま推移している。しかし、処理時間は現場技能の向上と相まって徐々に短縮され、現在では 1.6% という高いスタート C 濃度にもかかわらず約 68min にまで達するに至った。このため、1980 年 1～6 月では、1 基の AOD (アーク炉 2 基稼働) で 48 000 t の生産を達成し、特に 3 月には月間 9 538 t、456

ヒートおよび平均1日17.5ヒートという月間最高記録を達成した。

3.4 耐火物における改善

C B法開発当初、カルドー法およびローター法の場合のように、2次燃焼による深刻な耐火物損傷が懸念された。しかし、炉解体時のれんが残寸測定時にその影響は認められず、Fig. 9に示すマ

Fig. 8. Change of Si consumption and heat time (Austenitic grades).

クロ的な結果を見ても何ら問題ないことが明らかとなった。特にC B法採用前後のB-Brickの耐用回数はほとんど変化が無い。これは2次燃焼による高温域が浴攪拌の最も強く、しかも熱伝播の最も速い鋼浴面中央に集中しているためである。加えて、Table 3に示すリボンれんがA-Brickの採用により第4期には、ベッセル耐用回数は190回に達した。リボンれんがはB-Brickとほぼ同じ成分であるが、電融原料を使用していることでか

Fig. 9. Change of lining life in last 6 years.

Table 3. Properties of wear brick.

		Rebonded Mg-Cr (A)	Direct-bonded Mg-Cr (B)	Direct-bonded Mg-Cr (C)
Bulk density (g/cm ³)		3.25~3.35	3.05~3.20	3.05~3.20
Apparent porosity (%)		11.0~14.0	13.0~17.0	12.5~16.5
Bending strength (kg/cm ²) (at 1450°C)		110~160	60~100	60~100
Refractoriness under load (at 2kg/mm)		1650°C +	1650°C +	1650°C +
Coefficient of linear expansion (at 800°C)		0.79	0.82	0.85
Chemical composition (%)	SiO ₂	1.68	1.37	1.50
	Al ₂ O ₃	7.62	7.21	7.42
	Fe ₂ O ₃	3.66	3.47	3.52
	Cr ₂ O ₃	14.25	15.71	11.81
	CaO	0.77	0.82	0.73
	MgO	71.51	70.76	74.30

(By courtesy of Tokyo Yogyo Co. Ltd.)

さ比重、気孔率および熱間抗折力などの特性値で大幅な改善が認められている。更に、 MgO を主体としたスラグ・コントロールにより、第5期には235回の耐用を得るに至り、耐火物原単位も 6.7 kg/t に達した。

4. 結 言

星崎工場 20t AOD において、羽口からの底吹きと同時に上吹きを行いその2次燃焼生成熱を直接溶鋼に伝播させることを特長とするCB法を開発した。2年余にわたる実作業の中で確認された本法の冶金学的および操業面の特長は次のとおりである。

- (1) CO_2 生成により、昇温速度およびCREがそれぞれ150%および5%向上する。

- (2) 上吹き O_2 により、脱炭速度が58%向上する。
- (3) 熱経済性の改善が実現でき、 32.8 Mcal/t の熱的利益が得られた。
- (4) 上記CB法の効果により、実作業においては電力原単位で 78 kWh/t 、Si 原単位で25%、処理時間で約11minなどの節減および短縮が図れた。

但し、現在のCB法はCOの25%を CO_2 に燃焼させているに過ぎない。今後はこの比率を向上させることもしくは 93.9 Mcal/t 排出している廃ガスの潜熱および顕熱の活用を図ることが省エネルギー上必要である。

最後に本報作成に際し耐火物に関する研究成果をご提供下さいました東京窯業㈱殿に感謝の意を表します。