

# 生Cr鉱石溶融還元法を利用した 高生産性ステンレス鋼精錬技術の開発\*

川崎製鉄技報  
28 (1996) 4, 213-218

## Development of Highly Efficient Stainless Steelmaking by Cr Ore Smelting Reduction Method



岸本 康夫  
Yasuo Kishimoto  
千葉製鉄所 製鋼部製  
鋼技術室 主査(課長)



田岡 啓造  
Keizo Taoka  
ダイワスチール(株) 水  
島事業部 課長



竹内 秀次  
Syuji Takeuchi  
技術研究所 製鋼研究  
部門 主任研究員(課  
長)

### 要旨

川崎製鉄は千葉製鉄所のリフレッシュ計画の一環としてステンレス鋼新製鋼工場を建設し、1994年7月に操業を開始した。本論文では、新工場の中核である溶融還元炉(SR-KCB)と脱炭炉(DC-KCB)の設計思想、設備仕様の決定について述べる。溶融還元炉として使用する転炉では、砂状のCr鉱石の直接使用や、スクラップ大量溶解を可能とする仕様にした。また脱炭炉では溶融還元炉から出湯される粗溶鋼をCrの酸化を抑制しつつ高速に脱炭できる希釈ガス利用の強撈拌型上底吹き転炉を採用した。二次精錬設備であるVODとの複合脱炭により極低炭素鋼までクロムの酸化をミニマムとした溶製が可能である。

### Synopsis:

Kawasaki Steel constructed a new stainless steelmaking plant as a part of modernization plan of its Chiba Works, which started its operation in July 1994. This report describes the design of two main converters in a steelmaking shop, SR-KCB and DC-KCB. Main features of SR-KCB are the direct use of Cr ore sand and a high scrap melting capability. In DC-KCB, a rapid decarburization from high carbon content of more than 5% can be achieved by strong stirring and large flow rates of dilution gas. By a combination of DC-KCB and VOD, ultra low carbon steel can be produced without excess chromium oxidation in an ordinary treatment time.

### 1 緒 言

千葉製鉄所リフレッシュ計画の一貫として建設された新ステンレス鋼製鋼専用工場(第4製鋼工場)は1994年7月に稼働し、順調に操業を続けている。

新製鋼工場での製造プロセスについては、生産性・品質・環境など様々な観点から検討が進められたが、精錬プロセスの決定に際しては、ステンレス鋼製造コストの大半を占めるCr、Niなどの主原料の選択に自由度を持たせる事を第一に考慮した。その結果、電力を多量に使用するフェロクロムの使用を最小とするべく、製鉄所立地の有利さを活かして酸素とコークスを利用し直接Cr鉱石を還元する溶融還元炉の採用を決めた。またステンレス鋼スクラップの大量使用にも対応可能な設備にすることにも注力した。本論文では、生Cr鉱石の溶融還元法を中心に脱炭精錬を含めたステンレス鋼精錬技術の開発について、その開発経緯と設備仕様の決定、立ち上げ後の操業概要について報告する。

### 2 川崎製鉄におけるステンレス鋼製鋼プロセスの変遷

川崎製鉄では、1954年に西宮工場で電気炉によるステンレス鋼の

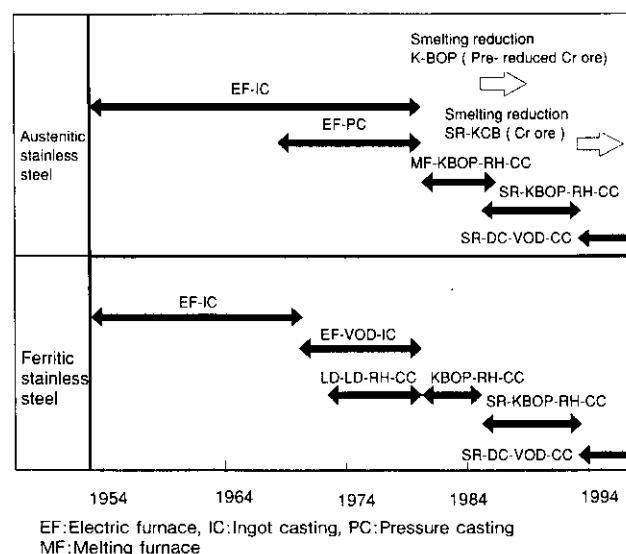


Fig. 1 Trend of stainless steel making process in Kawasaki Steel

製造を開始して以来、42年間にわたって幾多の設備・プロセスの改善を行い、生産性、品質の向上と製造コストの低減に努めてきた。

Fig. 1 にその間のステンレス鋼製鋼プロセスの変遷を Ni 系と Cr 系

\* 平成 8 年 10 月 8 日原稿受付

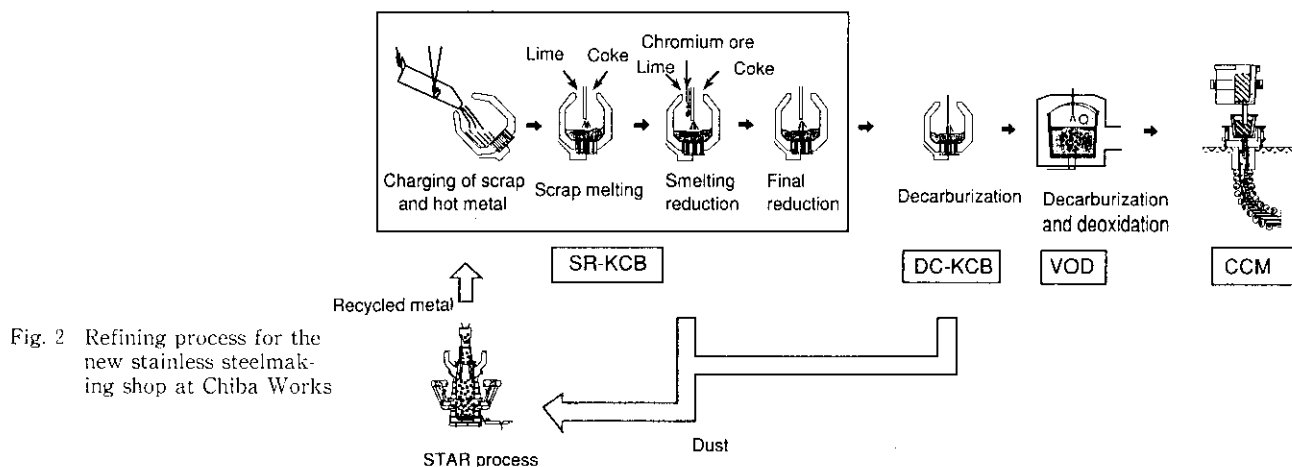


Fig. 2 Refining process for the new stainless steelmaking shop at Chiba Works

に分けて示す。

この間の大きな変化は、

- (1) 1970年代初頭—フェライト系ステンレス鋼へのVOD導入と、千葉製鉄所でのマルテンサイト系ステンレス鋼のLD転炉2回吹錬法—連鑄機による製造開始
- (2) 1981年—千葉製鉄所への製鋼工場集約とK-BOP（上底吹き転炉）の導入
- (3) 1986年—K-BOP2/2基による予備還元Crペレット溶融還元法の導入。および翌年の電気炉廃止
- (4) 1994年—第4製鋼工場稼働によるCr鉱石溶融還元法と垂直曲げ型連鑄機の導入

に代表される。

上記のプロセス・設備改善は、ステンレス鋼の需要増大に対応するための生産性の向上対策、あるいは高純度化などの品質対応であると同時に、コスト低減のための安価原料使用技術と電力から石炭エネルギーへの移行による省エネルギー対応技術でもあった。しかるに、今回のリフレッシュ計画においては産業廃棄物レスなど都市型製鉄所としてのあるべき姿を目指した技術開発をも盛り込んだものとなっている。

### 3 新ステンレス精錬工場のコンセプト

Fig. 2に新ステンレス工場における精錬プロセスの概要を示す。都市型製鉄所である千葉製鉄所の立地条件を勘案して、特に環境問題を意識した産業廃棄物の無いリサイクル重視のプロセスとなっている。具体的には、ステンレス鋼ダスト処理用新製錬炉（STAR炉）を建設し、製鋼工場から発生する含Crダストを溶解、還元しステンレス鋼原料としてリサイクルするプロセスを完成させた。ステンレス鋼スラグについても路盤材またはSTAR炉などの副原料としてリサイクルしている。また、新ステンレス精錬工場から発生するガスは回収され、製鉄所のエネルギー源として有効に活用されている。

Fig. 3にSTAR炉の概要を示す<sup>2)</sup>。第4製鋼転炉より排出されるダストはシクナーにおいて集塵水より濃縮されてスラリーとなる。スラリーは直接脱水・乾燥設備に送られ、STAR炉の原料となる。STAR炉はコークス充填型の二段羽口型溶融還元炉であり、コークスは炉上から供給される。一方、原料となるステンレス鋼ダストは炉下部に取り付けた二段羽口の上段から粉体状で吹き込まれ溶融・還元される。原料としては、製鋼工場発生ダストだけでなく製鉄所から発生する酸洗スラジなども同様に扱うことができる。乾ダストはそのまま吹き込み、水分を含んだダストについてはスラリー状原

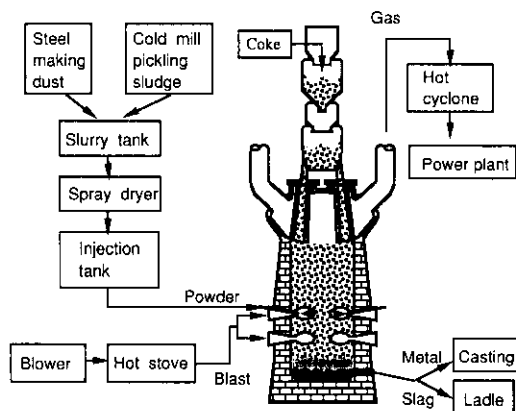


Fig. 3 Schematic illustration of STAR process

料をスプレッドライヤで乾燥後に吹き込む。また、ステンレス鋼脱炭炉から発生するスラグはSTAR炉用などの造滓材としてリサイクル使用されており、産業廃棄物のミニマム化に貢献している。

## 4 Cr 鉱石を用いた溶融還元プロセスの開発

### 4.1 溶融還元炉の設計思想

千葉製鉄所では、1985年より第一製鋼工場においてすでに2基のK-BOPを用いた溶融還元プロセスを採用していた。Table 1に第一製鋼工場における溶融還元プロセスと今回採用した新ステンレス工場における溶融還元プロセス(SR-KCB)の主な違いを比較して示す。

Table 1 Main features of SR-KCB in the new stainless steelmaking shop compared with those of K-BOP in No.1 steelmaking shop

|                                                      | K-BOP in No.1 steelmaking shop | SR-KCB in No.4 steelmaking shop   |
|------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Cr source                                            | Pre-reduced Cr ore<br>Scrap    | Cr ore<br>Scrap<br>Recycled metal |
| Inner volume of furnace (m <sup>3</sup> )            | 173                            | 372                               |
| Heat capacity (t)                                    | 85                             | 185                               |
| Max. O <sub>2</sub> flow rate (Nm <sup>3</sup> /min) | 300                            | 950                               |
| Bottom gas flow rate (Nm <sup>3</sup> /min)          | 0.6~0.8                        | 0.5~1.2                           |

Table 2 Typical example of particle size distribution of Cr ore

| Particle size<br>( $\mu\text{m}$ ) | 600 | 300  | 150  | 125  | 45   |
|------------------------------------|-----|------|------|------|------|
| Cumulative<br>greater than<br>(%)  | 0.1 | 21.0 | 80.4 | 87.1 | 99.7 |

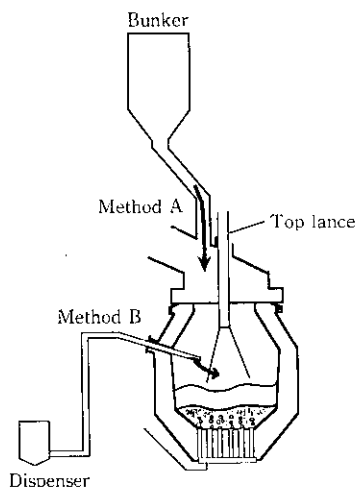


Fig. 4 Experimental method for Cr ore addition in K-BOP in No.1 steelmaking shop

従来1製鋼では、連々鋳の鑄造時間以内に短時間で処理するために半還元Crペレットを溶融還元していたが、新工場では事前処理を全く必要としないCr原鉱石を直接炉内に投入可能な設備にした。そのために第一に、砂状のCr鉱石を炉内に直接歩留まり良く添加するためのCr鉱石投入専用ランスを設置した。

第二に、原鉱石を使用するのに対応して脈石分の希釈や脱硫が可能なスラグ組成に設計することを念頭に置いて溶融還元炉は多量のスラグを炉内に滞留できるように炉容積を大きくした。

第三に、Cr原鉱石を所定の時間内に溶融還元することを可能とするために酸素供給速度を最大 $950 \text{ Nm}^3/\text{min}$ と従来より大幅に増加させた。

第四に、1製鋼での実験と操業経験から、Cr鉱石の還元速度を大きくしかつスクラップの大量溶解を可能とするべく、8本の底吹き二重管羽口を備えた強撹拌型上底吹き転炉とした。底吹きガスは $0.5 \sim 1.2 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot \text{t}$ とした。

#### 4.2 Cr 鉱石投入ランスの開発

多量の電力を使用するフェロクロムの使用を最小にし、Cr原鉱石を直接使用することが、新工場溶融還元炉における原料の配合自由度を高める上で最も重要な課題であった。世界で産出されるCr鉱石の大半は砂状であり、添加方法によっては排ガス系への飛散ロスが懸念される。そこで、事前に第一製鋼工場ではCr鉱石添加実験を行い、種々の添加方法の得失を比較した。

Table 2に、Cr鉱石の粒度分布の一例を示す。150～600 $\mu\text{m}$ が80%以上を占める細粒であり、転炉への投入が不適切な場合には飛散が懸念される。そこで、第一製鋼工場においてFig. 4に示す二つの方法で、Cr鉱石を添加する実験を行った。すなわち、炉上のバンカからバッチで流し込み投入する方法(方法A)、および出鋼孔から専用ランスを挿入しCr鉱石を転炉内へ直接投入する方法(方法B)である。方法Bの専用ランスは50Aの鉄パイプにハイアルミナキャストابلを施工したものであり、図中に示すように先端をスラグ面

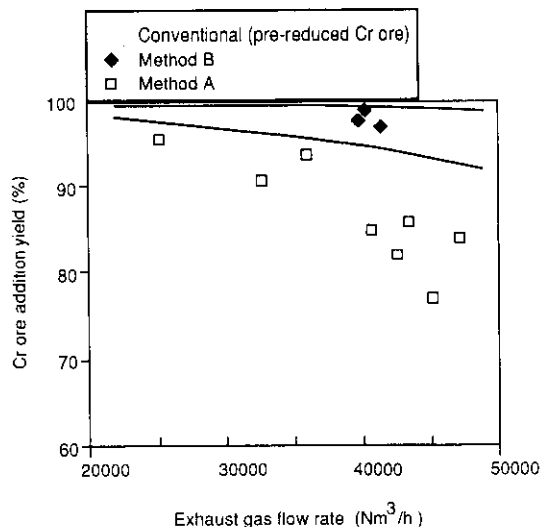


Fig. 5 Relation between exhaust gas flow rate in K-BOP and Cr ore addition yield

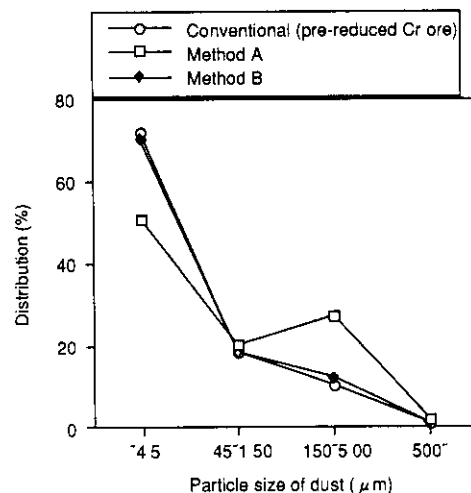


Fig. 6 Change in particle sizes of converter dust in various addition methods of Cr ore or pre-reduced Cr ore

に向けて鉱石が投入されるようにした。またキャリアガスとして $\text{N}_2$ ガスを $10 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 吹き込むことができるようにした。

本実験ではCr鉱石の転炉内への添加歩留りを調査することが目的であるので、スラグ中およびメタル中へのCr鉱石歩留りの和を転炉内へのCr鉱石の添加歩留りと定義した。Fig. 5に各実験法による実験時の転炉排ガス流量とCr鉱石添加歩留りの関係を示す。ここで、従来法とは予備還元した半還元Crペレットを炉上から投入した場合である。半還元ペレットは粒度が10～15mmが85%以上の塊状の原料であり、半還元ペレットの添加歩留りは95%以上である。

Fig. 6に、集塵水より採取した転炉ダストの粒度分布を従来法と比較して示す。炉上からの流し込み法(A法)では従来法や実験B法に比べてCr鉱石の大半を占める150～500 $\mu\text{m}$ のダストが増加しており、飛散ロスが増加している可能性が高い。ダスト中のCr成分を分析したところ、実験A法では、150～500 $\mu\text{m}$ の領域でCrが高くなっており、この結果からも実験A法ではCr鉱石が直接飛散していたと考えられる。特に酸素供給速度を増加させた場合に飛散率が高くなった。実験B法においてはCr鉱石添加歩留まりは98%以上であった。また、ランスの位置の影響を見ると、炉内に深く挿入してCr鉱石を流し込んだ場合のほうが若干歩留まりが高くなった。

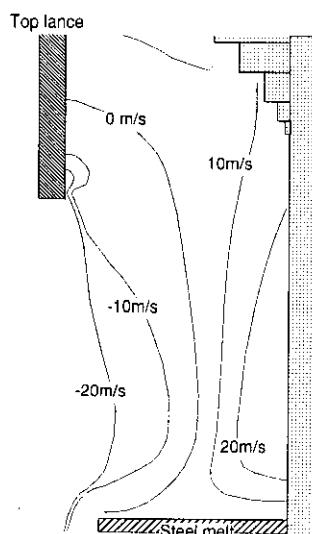


Fig. 7 Typical example of numerically calculated contour of gas velocity in converter (minus: downward flow, plus: upward flow)

以上の実験から、炉上からCr鉱石を流し込む方法は、酸素供給速度が増加するにつれてCr鉱石の飛散率が高くなるため、Cr鉱石の添加方法としては適切な方法ではないことが明らかとなった。また、出鋼孔を通してCr鉱石を炉内に添加する方法では、Cr鉱石を歩留まり良く添加できることがわかった。

この知見をさらに新製鋼工場設計に活かすべく、転炉内ガス流れの数値解析を行った。流体解析プログラムPHOENICSを用いて二次元ガス流れについて解析した。反応モデルは加藤ら<sup>3)</sup>の提案したモデルをPHOENICSに拡張したものである。炉内の二次燃焼率が実測値と計算値間で一致するようにして、炉内ガス流速を計算した。計算例をFig. 7に示す。炉内では上吹きランスから供給される酸素により、中心を軸に下向きの流れが生じており、壁際に行くほど上昇流が早くなる。

この計算結果から、Cr鉱石を添加した位置でのガス流速を求めた。Cr鉱石添加歩留りにはこのガス流速以外に、添加位置での鉱石落下の初速が影響を与えるものと考えられるが、本実験条件では実験A法では落下速度は6 m/s程度、実験B法では30 m/s程度であった。ここでは、ガス流速と落下速度の差を便宜上鉱石の相対速度として定義し、その相対速度とCr鉱石の添加歩留りの関係をFig. 8に示した。両者には明瞭な関係が見られることから、大略この相対速度によりCr鉱石の添加歩留りが予測できることがわかった。

添加歩留りを向上させるには、Cr鉱石の初速を上げて相対速度を高める方法も考えられるが、Cr鉱石を高速で配管輸送すると配管摩擦の問題が生じるので添加時の初速はできるだけ小さくした方がよい。したがって、下向き流れの生じる炉内中心近傍にCr鉱石を直接添加する方法が適切であることがわかった。

以上の実験結果および数値解析結果から新製鋼工場では、Cr鉱石専用投入ランスを採用した。Fig. 9に新工場において採用したCr鉱石投入ランスの概要を示す。Cr鉱石は、搬送性・棚つりの防止、あるいは熱エネルギーの損失を最小にするために事前にロータリーキルンにて乾燥され、炉上に搬送され、クロムランスから吹き込まれる。Cr鉱石投入ランスは、上吹きランスと独立に昇降機能を有し、溶融還元期にのみ下降し、Cr鉱石を投入する。ランスは水冷三重管になっており炉内の熱負荷に耐えられる構造とした。また、Cr鉱石の摩擦対策として耐摩耗性セラミックの内挿方式を採用している。

Fig. 8中には、溶融還元炉におけるCr鉱石の添加歩留りを示す。

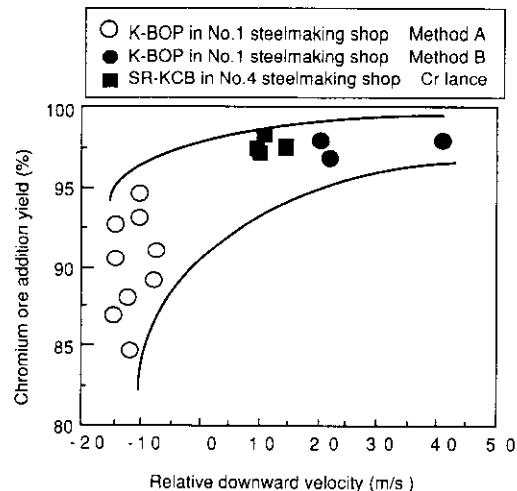


Fig. 8 Relation between Cr ore addition yield and relative downward velocity calculated as the difference between downward velocity of Cr ore and that of gas

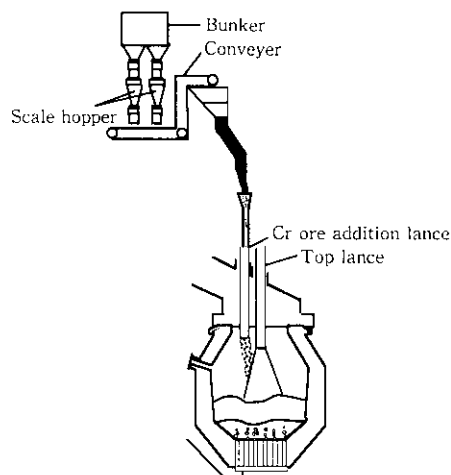


Fig. 9 Schematic illustration of water-cooled lance for Cr ore addition in SR-KCB in the new stainless steelmaking shop

Cr鉱石専用投入ランスから吹き込んだ場合の添加歩留りは97%以上であり、特別な処理をすることなく砂状のCr鉱石を飛散ロスなしに使用できている。

Cr鉱石の転炉への直接使用に関する課題としては、これまでに述べた添加歩留り向上と同時に、難還元性であるCr鉱石を大量投入した際の還元不良対策があった。1製鋼の実験および5t試験転炉の実験から、脈石分の希釈とスラグメタルの十分な攪拌を行うことにより問題なく還元できることを確認した。

### 4.3 原料配合自由度の高い溶融還元炉操業

1994年7月より新工場が立ち上がりその後順調に稼働している。この節では溶融還元炉の主な操業結果を報告する。Fig. 10に溶融還元炉の操業パターンの一例を示す。事前に炉内に装入したスクラップ・ダストメタルを溶解するSR-0期、所定の温度( $T$  540 ~ 1560°C)まで昇温するSR-1期、Cr鉱石を溶融還元するSR-2期および、仕上げ還元期であるSR-3期に分かれる。スラグの塩基度は1製鋼<sup>4)</sup>と同様に溶融還元に適するスラグ組成を設計すると共に、脱硫機能およびスラグの再利用を考慮して2.5 ~ 3.0に設定している。Fig. 11には、Cr鉱石を用いた場合の溶鋼温度とスラグ中(T, Cr)の関係を半還元Crペレットの場合と比較して示す。適正な条件ではCr鉱石

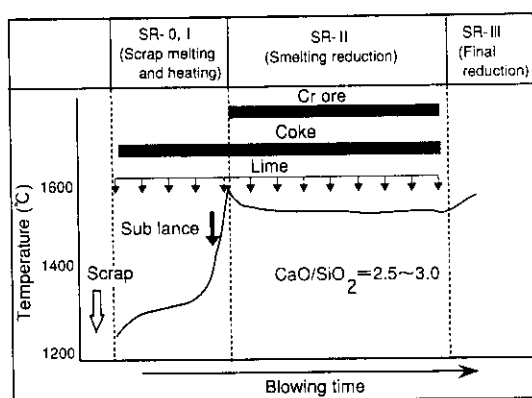


Fig. 10 Typical example of blowing pattern in SR-KCB

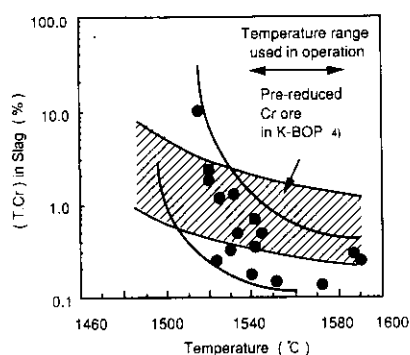


Fig. 11 Effect of temperature on reduction of (T. Cr) in slag

Table 3 Blowing conditions and raw material balance in SR-KCB

| Item                              |                                       | AISI 304    | AISI 430 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|----------|
| Raw material                      | Cr ore (kg/t)                         | 230         | 280      |
|                                   | Scrap (kg/t)                          | 190         | 130      |
|                                   | Recycled metal by STAR process (kg/t) | 250         | 50       |
| Blowing time (min)                |                                       | 88          | 85       |
| Temperature (°C)                  |                                       | 1540 ~ 1580 |          |
| Basicity (CaO/SiO <sub>2</sub> )  |                                       | 2.5 ~ 3.0   |          |
| [T. Cr] in slag (%)               |                                       | < 1.0       |          |
| Cr yield (%)                      |                                       | 91          |          |
| Tapping composition in SR-KCB (%) |                                       | C           | 5 ~ 6    |
|                                   |                                       | Cr          | 9 ~ 12   |
|                                   |                                       | S           | < 0.005  |

の還元は半還元Crペレットの場合と同等以上に進行している。これは、Cr鉱石は砂状であり塊状のペレットに比べて反応界面積の点で有利であるためと思われる。Table 3に溶融還元炉の主な操業成績をまとめた。

## 5 強攪拌上底吹き転炉—VOD複合脱炭による高速脱炭技術の開発

### 5.1 強攪拌上底吹き転炉による高速脱炭技術

溶銑あるいは溶融還元炉から生産される含クロム溶銑を脱炭する

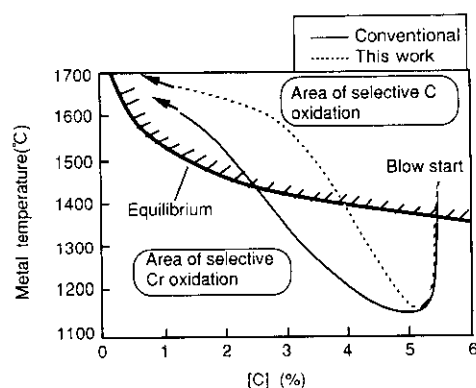


Fig. 12 Schematic route of [C] and temperature in DC-KCB

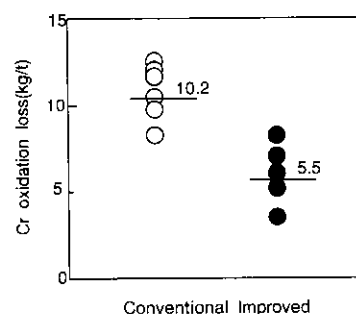


Fig. 13 Comparison of Cr oxidation loss from blow start to 1.2% carbon in the improved method with that of conventional method

には、高炭素濃度域での高速脱炭が必要であり、AODに比較してはるかに大きな酸素供給速度で吹錬できる転炉が必須となる。

新製鋼工場では第1製鋼工場に比べて大量のCr鉱石を使用するため、脱炭炉に供給される含Cr溶銑のクロム濃度が高まる傾向にある。第1製鋼工場の知見を基にクロム酸化の少ない高速脱炭法を開発した。

Fig. 12に脱炭炉における脱炭中のCと温度の推移を示す。溶融還元炉から出銑される含クロム溶銑は、C = 5 ~ 6%であり、1450°C程度の鋼浴温度を有するが、前装入されるスクラップなどの影響で吹錬当初は1200°C以下まで低下する。図中にSinkovich<sup>9)</sup>の平衡式から決定されるクロム酸化領域を示す。ここで、[Cr] = 18%、[Ni] = 8%とした。平衡線より低温、低炭素域では酸化が進行することになる。したがって、初期のCが高い時期に溶鋼温度をいかに早く上昇させるかが重要である。そのために初期の酸素供給速度を大きくとり高速吹錬を図った。高速吹錬の課題はスピittingの抑制であるが、ランスチップの改善とランス高さの適正化によりスピittingの低減を実現した。Fig. 13に従来法と初期昇温を改善した場合における吹錬初期から[C] = 1.2%までのクロム酸化の比較を示す。改善技術により初期のクロムロスが大幅に減少できた。

[C] < 1.0%の低炭素濃度域では、耐火物の溶損防止とクロム酸化を抑制するため1700°C前後の狭い温度範囲にコントロールする技術が必要となる。従来、低炭素濃度域でのクロム酸化を抑制するには、(1)希釈ガスを増加させる、(2)攪拌力を増加させるなどが提案されている。しかし、底吹き攪拌力や底吹き希釈ガスは羽口本数で制限されており大幅に増加できない。当社では第一製鋼工場より実験を重ね、クロム酸化を低減しつつ溶鋼温度上昇を抑制する技術として、吹錬末期に上吹きランスから窒素を単独で吹き付ける技術(上吹きN<sub>2</sub>法)を開発した<sup>9)</sup>。今回吹錬末期に上吹きN<sub>2</sub>を用いること

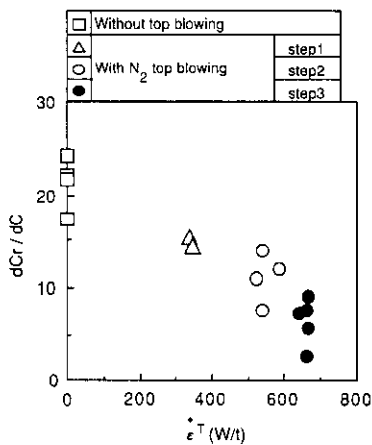


Fig. 14 Effect of top  $N_2$  blowing method in the final stage of decarburization in DC-KCB ( $\epsilon T$ : Stirring energy by top blowing  $N_2$  (W/t))

で底吹き羽口の酸素供給速度を維持したままクロム酸化を抑制できた。Fig. 14 に低炭素濃度域でのクロム酸化量と上吹き  $N_2$  の攪拌力<sup>7)</sup> の関係を示す。上吹き  $N_2$  法では、 $N_2$  流量の増加によりクロムロスが低減されたが (step 1 から 2)、さらに同一  $N_2$  流量でもランスを低下させハードブローにするとクロムロスが小さくなった (step 2 から 3)。上吹き窒素法の効果としては、(1)  $CO$  分圧希釈効果と、(2) 上吹きガスによるスラグメタルの攪拌力強化の二つが考えられるが、このようにランス高さの影響があることから、スラグメタルの攪拌力増加の効果が大きいと考えられる。以上述べたように強攪拌型上底吹き転炉を用いることにより溶融還元炉から生産される  $Cr$  含有溶銑を  $Cr$  の過剰酸化を生じることなく高速に脱炭できる。

## 5.2 上底吹き転炉—VOD による複合脱炭技術

上吹き窒素法により、低炭素濃度域のクロム酸化量は大幅に低減されたが、転炉で低炭素濃度域まで脱炭すると脱炭酸素利用率の低下により転炉吹錬時間の延長とクロム酸化を招く。Fig. 15 に転炉吹き止め  $C$  とクロムロスの関係の一例を示す。 $[C] < 0.1 \sim 0.2\%$  では脱炭酸素利用率の低下によりクロムロスが急激に増加する。この問題点を解決するために新製鋼工場では転炉と VOD の複合脱炭プロセスを採用した。Fig. 16 に DC-KCB と VOD の脱炭酸素利用率の  $[C]$  との関係を示す。VOD では真空脱炭を行うことにより低炭素濃度域でも高い脱炭酸素利用率を得ることが可能であり、クロムロスを最小にして脱炭可能である。ただし、VOD の酸素供給速度は DC-KCB に比較して小さく、 $[C]$  を高くすると VOD での処理時間の増加が問題となる。したがって、転炉での吹き止め  $[C]$  を  $0.1 \sim 0.2$  とし DC-KCB と VOD の処理時間の合計を最小とすることにより高速鑄造とのマッチングを図っている。この複合脱炭プロセスを採用することにより、脱炭炉と VOD の処理時間の均等化とク

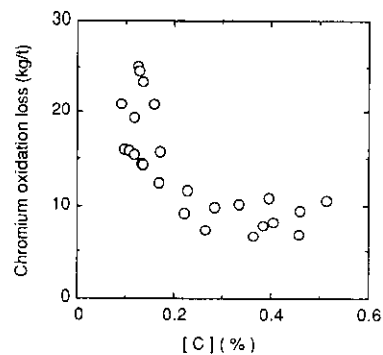


Fig. 15 Relation between carbon content and  $Cr$  oxidation loss in the low carbon range in DC-KCB ( $[\%C] < 0.4$ )

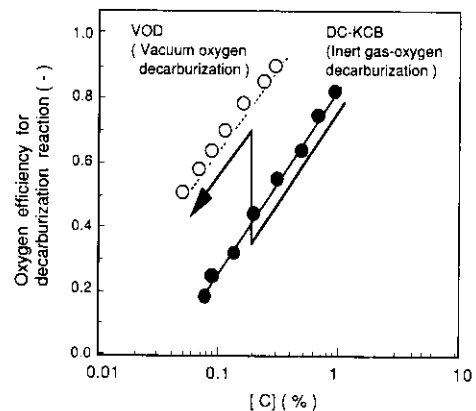


Fig. 16 Relation between oxygen efficiency for decarburization and carbon content in DC-KCB and VOD

ロムロスミニマム化を可能としている。

## 6 結 言

千葉製鉄所のリフレッシュ計画の一環として建設されたステンレス鋼専用製鋼工場の中核である溶融還元炉と脱炭炉の設計思想、設備仕様の決定、および立ち上げ後の操業概要を述べた。

主原料の選択自由度を大幅に高めるために、溶融還元炉では、砂状の  $Cr$  鉱石の転炉での直接使用や、スクラップ大量溶解を可能とする仕様にした。また脱炭炉では溶融還元炉から出湯される  $Cr = 9 \sim 13\%$  の粗溶鋼を  $Cr$  の酸化を抑制しつつ高速に脱炭できる希釈ガス利用の強攪拌型上底吹き転炉を採用した。二次精錬設備である VOD との複合脱炭によりクロムの酸化をミニマムにして極低炭素鋼まで溶製可能である。

新工場は 94 年 7 月に稼働を開始し、当社の主原料戦略に合わせたステンレス鋼の合理的な溶製が続けている。

## 参 考 文 献

- 1) 鍋島祐樹, 小倉 滋, 山田純夫: 川崎製鉄技報, 28(1996)4, 212
- 2) 長谷川伸二, 児子祐祐, 桃川秀行, 野村 真, 小林敬二, 板谷 宏: 材料とプロセス, 8(1995)4, 897
- 3) 加藤嘉英, J. C. Grosjean, J. P. Reboul, P. Riboud: 鉄と鋼, 75(1989)3, 478
- 4) 田岡啓造, 多田 睦, 山田純夫, 野村 寛, 大西正之, 馬田 一: 鉄と鋼, 76(1990)11, 1863
- 5) A. Simkovich: Trans. Metal Soc. AIME, 221(1961), 416
- 6) 菊池直樹, 山口公治, 竹内秀次, 別所永康, 廣田哲仁, 岸本康夫, 西川 廣: 材料とプロセス, 9(1996)4, 716
- 7) 加藤嘉英, 中西恭二, 齊藤健志, 野崎 努, 鈴木健一郎, 江見俊彦: 鉄と鋼, 66(1980)11, 881