

解説

受賞技術－34

環境調和型高品質ステンレス鋼 溶製プロセスの開発

Development of Environmentally Conscious,
High-Quality Stainless Steel Making Process

JFEスチール(株)
スチール研究所
研究技監

岸本康夫
Yasuo Kishimoto

JFEスチール(株)
スチール研究所 製鋼研究部
部長

奥山悟郎
Goro Okuyama

JFEスチール(株)
スチール研究所 製鋼研究部
主任研究員

小笠原 太
Futoshi Ogasawara

JFEスチール(株)
スチール研究所 研究企画部
部長

菊池直樹
Naoki Kikuchi

日本工業大学
基幹工学部 応用化学科
教授

内田祐一
Yu-ichi Uchida

1 緒言

ステンレス鋼は一般的にフェロクロム合金やスクラップを溶解して製造されるが、原料であるフェロクロム合金が製造時に電力を大量に消費するため、ステンレス溶製プロセスの環境負荷が高いという課題があった。また、ステンレス鋼に対してリンや炭素といった不純物元素の低減や、介在物低減等の高品質化の要求は年々高まっている一方で、ステンレス製造プロセスの高生産性を維持することが求められる。

上記技術課題に対して、今回の開発技術では、クロム鉱石を直接使用できる転炉型クロム鉱石溶融還元炉を用いたステンレス鋼溶製技術を確立した後¹⁾、溶融還元炉における使用エネルギーの効率を向上させるための炭化水素ガスバーナーを用いたクロム鉱石加熱添加技術^{2,4)}、および転炉と二次精錬工程での高速脱炭技術と介在物組成コントロール技術の開発を行った。本成果は令和2年度文部科学大臣表彰 科学技術賞(開発部門)、令和3年度第53回市村産業賞本賞等を受賞している。本稿では本技術の概要について報告する。

2 転炉型クロム鉱石溶融還元炉を用いたステンレス鋼溶製技術

ステンレス鋼の溶製コストにCr、Niの原料コストの占める割合は大きく、安価なCr源を用いた製鋼技術が求められてき

た。日本の電力コストが海外に比べて高いことから、フェロアロイメーカーが中心となって、電気炉(サブマージドアーケ炉)に代えて溶融還元法で高炭素フェロクロムを製造する研究が1980年代に進められた⁵⁾。続けて、転炉においてフェロクロムに代えて直接クロム鉱石を使用し、ステンレス鋼用の溶湯を製造する研究が鉄鋼各社で精力的に行なわれた⁶⁾。

これらの技術開発の結果を基に、1994年にJFEスチール(株)・東日本製鉄所千葉地区(旧・川崎製鉄(株)千葉製鉄所)で製鋼工場を集約し、ステンレス新製鋼工場を建設する際に、溶融還元炉と脱炭炉を用いたクロム鉱石溶融還元プロセスが採用された¹⁾。図1にプロセスフローを示す。

世界で産出されるクロム鉱石の大半は粉状であり、炉上からの投入においては排ガス系への飛散が懸念されるため、鉱石添加専用ランスを開発し、クロム鉱石を添加歩留り98%以上で溶融還元炉内に直接投入することを可能としている。また、酸素供給速度を大幅に高めることによりクロム鉱石直接使用時の熱供給速度の増加を図ると共に多量のスラグに対応した大容量の炉体を設けている。

クロム鉱石の還元においては、スラグ・炭材の界面積の確保が重要であり、スラグ組成の最適化に加えて、スラグ中の炭材量や炭材粒径がクロム鉱石還元速度に与える影響が大きい⁷⁾。そこで溶融還元炉では基礎試験結果を基に、炭材として従来のコークスに代えて熱崩壊性の高い石炭が採用された⁸⁾。スロッピングなどの操業不安定が解消されると共に、従来法

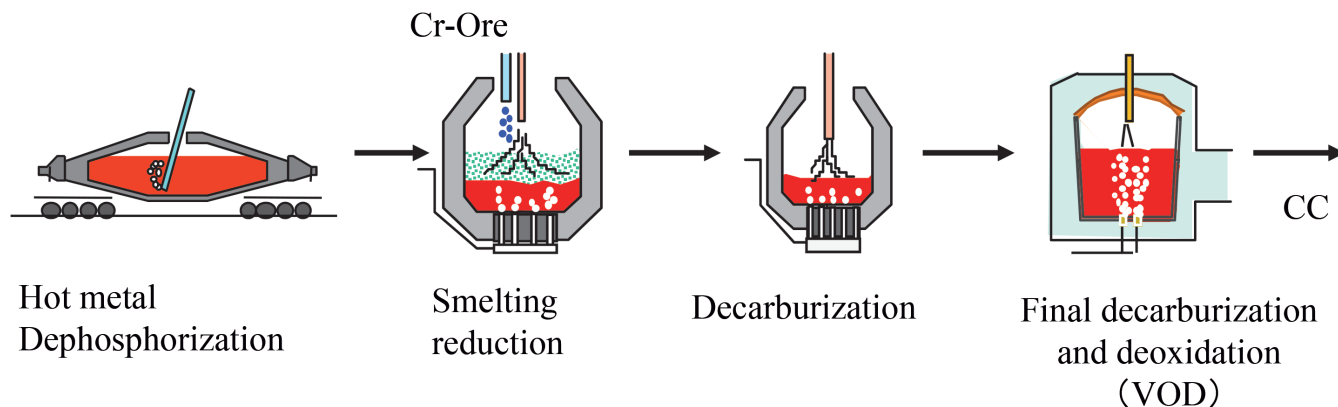


図1 溶融還元炉－脱炭炉を用いたクロム鉬石溶融還元プロセス

(コークス使用) よりもさらに還元が良好となった。この結果、クロム鉬石原単位の増加が図られた。また低S濃度溶湯の安定溶製などが可能となると共に、石炭のP濃度が低いいため低りんステンレス鋼に対しても溶融還元プロセスの適用が可能である。

3 クロム鉬石溶融還元炉における鉬石バーナー加熱添加技術の開発

クロム鉬石の溶融還元法プロセスでは、上に述べたように炭材を還元剤として、クロム鉬石中の酸化クロムを還元している。この反応は大きな吸熱反応であるため、クロム鉬石の還元量を増加するためには炉内への熱供給量の増加が必須である。そのため、熱源として多量の炭材が利用されており、上底吹き酸素との燃焼により熱供給している。

転炉の熱供給増加策として、酸素供給速度の増大や高二次燃焼技術の開発が行われてきた。しかしながら、酸素供給速度を増大させても、主に溶銑中のCと酸素の反応による、いわゆる一次燃焼が増加するものの、炉内からのダスト発生量が増加するため、FeやCrの歩留まりが低下するといった問題があった。また、高二次燃焼技術として、ランス高さの上昇や酸素ジェットをソフトブロー化するランスノズルの開発^{9,11)}が行われたが、高二次燃焼操業では炉内での熱発生量は増加するものの、クロム鉬石の還元反応領域への着熱効率が低いといった課題があり、耐火物への熱負荷が増大し、耐火物寿命が低下する懸念があった。

そこで、一次燃焼や二次燃焼に替わる熱源として、バーナー燃焼熱を新たな熱源として利用し、さらにバーナー火炎を介して粉粒状原料であるクロム鉬石を炉内に加熱添加することを想起し、研究開発を行った。これにより、バーナーの燃焼熱を還元反応領域へ効率的に着熱させ、熱源として利用される炭材を削減し、一層の省エネルギー化を図ることを目

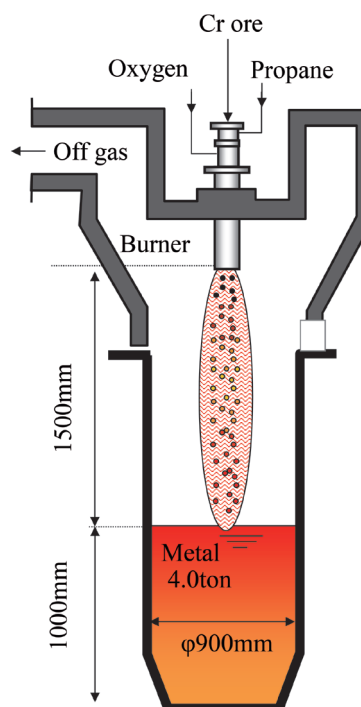


図2 4トン溶解炉を用いた実験設備模式図

指すものである。

3.1 クロム鉬石のバーナー加熱添加による着熱向上メカニズム²⁾

4トン規模の溶解炉でバーナーを用いた溶銑の加熱実験を実施し、クロム鉬石の添加条件によるバーナー燃焼熱の溶銑への着熱挙動を調査した。図2に実験設備の模式図を示す。実験ではクロム鉬石の添加方法によるバーナー燃焼熱の溶銑への着熱挙動を調査するために、1) バーナーのみ(鉬石添加なし)、2) バーナー火炎を介してクロム鉬石を添加する「鉬石加熱添加」、および3) 火炎外からクロム鉬石を添加する「鉬石非加熱添加」の3条件で行った。また、クロム鉬石には実機と同様の平均粒子径(d_{50})が約200 μm のものをを用いた。

図3にクロム鉱石供給速度と溶銑およびスラグの顕熱増加量の関係を示す。本実験ではフラックスは添加していないので、スラグは炉内に添加したクロム鉱石である。バーナー燃焼熱の溶銑およびスラグへの伝熱量として、実験中の溶銑温度変化より顕熱増加量を算出した。「鉱石加熱添加」条件の場合、クロム鉱石量が増加するにしたがい、溶銑およびスラグの顕熱増加量が増加した。それに対し、「鉱石非加熱添加」条件の場合は、「鉱石加熱添加」条件と比較して、同一鉱石添加量でも溶銑およびスラグの顕熱増加量が小さく、鉱石添加

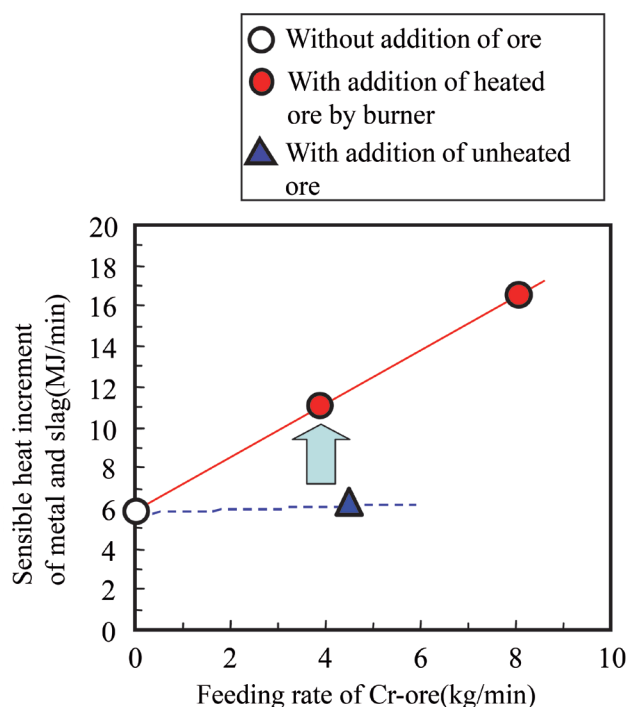


図3 クロム鉱石供給速度と溶銑、スラグの顕熱増加量の関係

無しバーナーのみと同等であった。以上から、バーナー火炎を介してクロム鉱石を加熱しながら添加することで、バーナー燃焼熱の溶銑およびスラグへの伝熱量が増大することが確認された。

次に、鉱石加熱添加法によるバーナー燃焼熱の溶銑およびスラグへの伝熱メカニズムを定量的に解明するため、数値解析により高温ガスから粉粒状原料への伝熱挙動を調査した。図4に鉱石供給速度と計算鉱石粒子温度および全鉱石粒子顕熱量の関係を示す³⁾。粒子供給速度の増加にともない、粒子温度やガス温度は低下するものの、加熱される鉱石供給量の増大により全粒子の顕熱量は増加する。

以上の計算結果をもとに、実験時のバーナー燃焼熱の溶銑およびスラグへの伝熱量を算出した。図5に伝熱量の内訳と伝熱メカニズムを示す³⁾。クロム鉱石供給速度が0 kg/min (火炎のみ) の場合では、火炎からの輻射または対流による伝熱のみで、溶銑およびスラグへの伝熱量は小さい。それに対し、鉱石を加熱添加することにより、火炎温度は低下し火炎からの伝熱量が低下するものの、加熱された粒子の顕熱量による伝熱が支配的になり、トータルの伝熱量が増大することとなる。以上から、加熱された鉱石粒子は伝熱媒体として機能し、鉱石加熱添加法によりバーナー燃焼熱を溶銑へ効率的に伝熱することが可能なことを確認した。

3.2 5トン転炉実験によるプロセス設計⁴⁾

図6に5トン上底吹き試験転炉とクロム鉱石加熱添加バーナーランスの概要を示す。クロム鉱石の添加方法によるバーナー燃焼熱の溶銑への着熱挙動の差異をさらに調査するために、1) バーナーは燃焼させずクロム鉱石を添加する「従来法」、2) クロム鉱石加熱添加バーナーランスからバーナー火

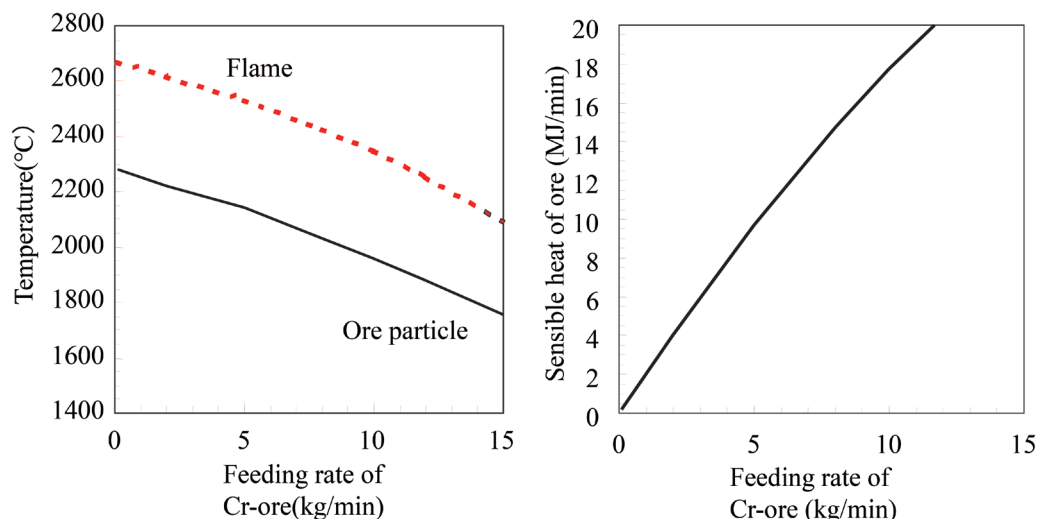


図4 鉱石供給速度と鉱石粒子温度および全鉱石粒子顕熱量の関係

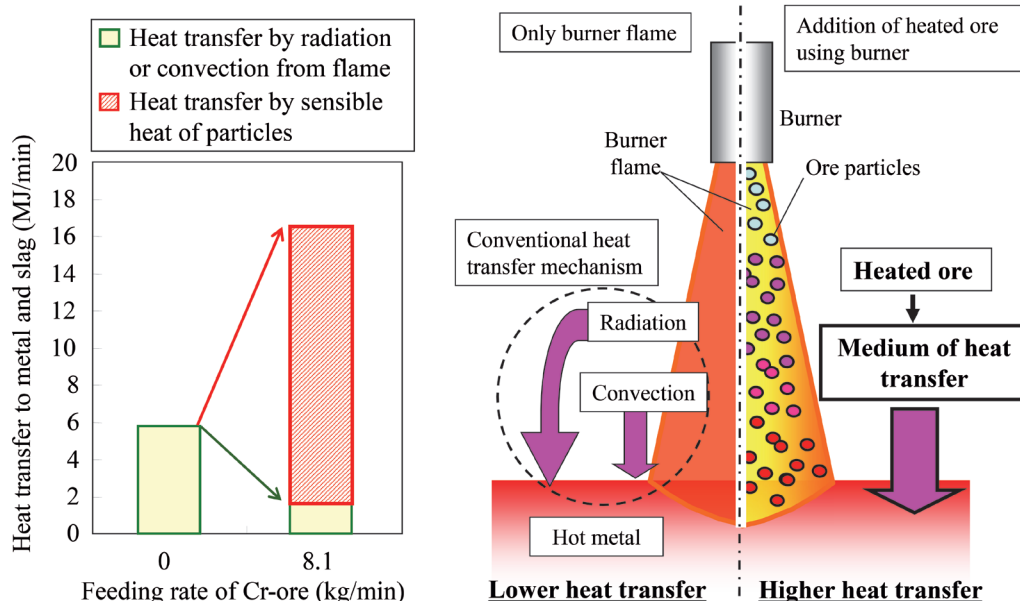


図5 溶銑およびスラグへの伝熱量の内訳と伝熱メカニズム

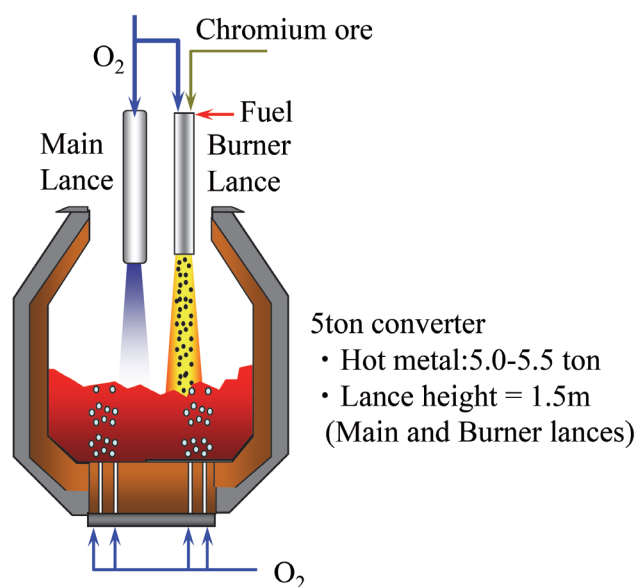


図6 5トン上底吹き転炉とクロム鉱石加熱添加バーナーランスの概要

炎を介してクロム鉱石を添加する「クロム鉱石加熱添加法」、および3) バーナーのみ点火させ、クロム鉱石はクロム鉱石加熱添加バーナーランスを介さず、火炎外から投入する「クロム鉱石非加熱添加法」の3条件で実験を行った。実験では転炉に溶銑を装入し、上底吹き酸素のみで所定の溶銑温度まで昇熱した後に、クロム鉱石を溶融還元する溶融還元吹錬を実施した。

図7に加熱鉱石添加速度と有効着熱量およびスーパーヒートの関係を示す。有効着熱量は、溶銑およびスラグの顕熱増

加量とクロム鉱石の還元熱の和とした。また、有効着熱量と溶銑温度相当の排ガス顕熱量の和と、入熱との差から求められる不明熱量を、排ガスのスーパーヒートと定義とした。バーナーによるクロム鉱石加熱添加法では、加熱鉱石添加速度の増加にともない有効着熱量が増加した。スーパーヒートは加熱鉱石添加速度の増加にともない低下するものの、バーナー無しのスーパーヒートよりも大きくなる条件では、耐火物溶損を助長する懸念がある。

図8に、スーパーヒートをバーナー発熱量あたりの加熱鉱石添加量に対して示す。この図より、バーナー発熱量あたりの鉱石添加量を0.4 kg/MJ以上とすることで、バーナー無しの場合よりもスーパーヒートが小さくなり、バーナーによる耐火物への熱負荷を低下できることがわかる。この結果をもとに、実機適用時のバーナー燃料やクロム鉱石の供給速度を適正化した。

3.3 実機クロム鉱石溶融還元炉への鉱石加熱添加バーナーランスの適用⁴⁾

以上の結果を踏まえ、JFEスチール(株) 東日本製鉄所千葉地区の上底吹き転炉型のクロム鉱石溶融還元炉(ヒートサイズ185トン)において、クロム鉱石投入ランスにバーナー機能を付与したクロム鉱石加熱添加バーナーランスを導入した。

図9に、5トン試験転炉および実機におけるクロム鉱石加熱添加速度/バーナー発熱量比と、バーナー燃焼熱の着熱効率の関係を示す。実機では5トン試験転炉の知見から、耐火物への熱負荷を増加させないために、図8で示した結果をもとにクロム鉱石加熱添加速度/バーナー発熱量比を0.5kg/

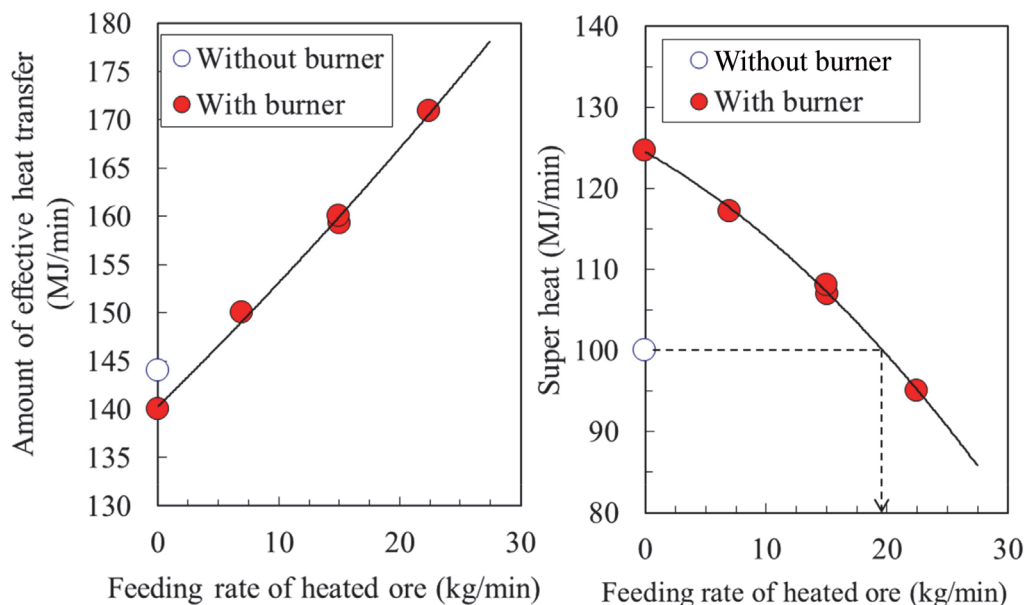


図7 加熱鉬石添加速度と有効着熱量およびスーパーヒートの関係

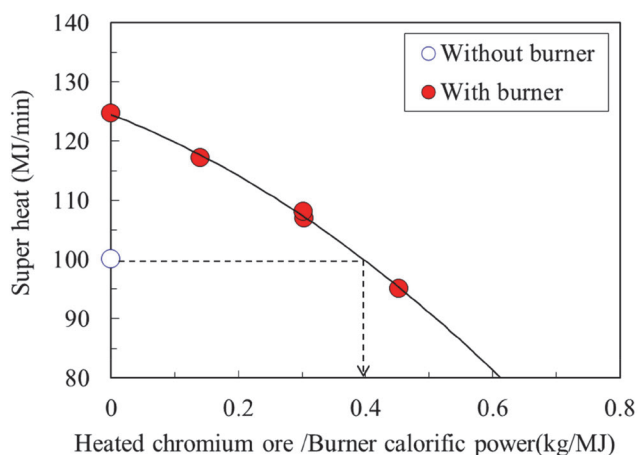


図8 クロム鉬石加熱添加速度/バーナー発熱量比とスーパーヒートの関係

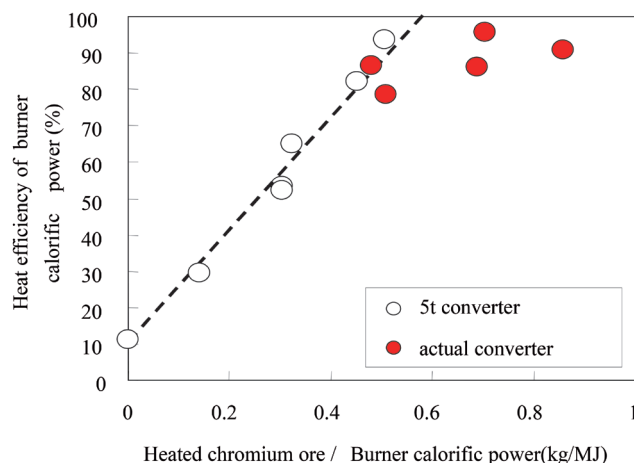


図9 5トン転炉および実機におけるクロム鉬石加熱添加速度/バーナー発熱量比とバーナー燃焼熱の着熱効率の関係

MJ以上とした。その結果、実機での操業においても、5トン試験転炉と同様にバーナー燃焼熱の着熱効率は80～90%と高位になり、バーナーによる耐火物への熱負荷は無く、安定的に操業可能であることが確認された。

図10にクロム鉬石加熱添加バーナーランス導入前後のクロム鉬石原単位と供給熱量原単位の関係を示す。供給熱量は、上底吹き酸素による一次燃焼熱、二次燃焼熱およびバーナー利用時はバーナー燃焼熱の総和である。供給酸素量一定の条件で、クロム鉬石加熱添加バーナーランス使用時は同一のクロム鉬石原単位における供給熱量が、導入前と比較して17%低減した。これにより、効率的な熱供給ができ、大きな省エネルギー効果が得られた。

図11に溶融還元炉でのクロム鉬石量当たりの供給エネルギーの比較を示す。従来法ではエネルギー源が炭材のみであるのに対し、本技術ではバーナーによりエネルギー源の一部を水素系燃料で代替し、かつ鉬石加熱添加技術により効率的にバーナー燃焼熱を炉内の溶銑およびスラグに伝熱することが可能となった。その結果、同一鉬石量当たりの供給エネルギー量はトータルで17%低減し、炭素燃焼由来のエネルギー量に限れば従来法と比較して26%減少した。

以上の結果、クロム鉬石の溶融還元炉において水素系燃料を利用したバーナー加熱添加技術を導入することで、クロム源などの主原料選択の自由度の向上に加え、従来よりも供給するエネルギーの原単位が削減し、省エネルギーが可能になった。

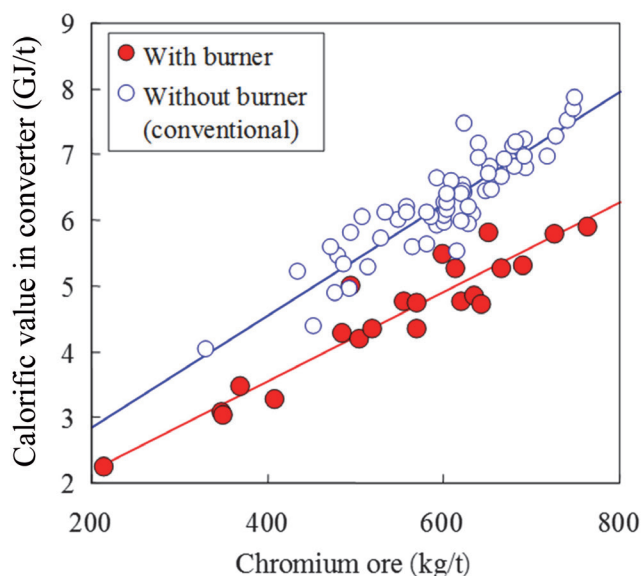


図10 クロム鉱石加熱添加バーナランス導入前後のクロム鉱石原単位と供給熱量原単位の関係

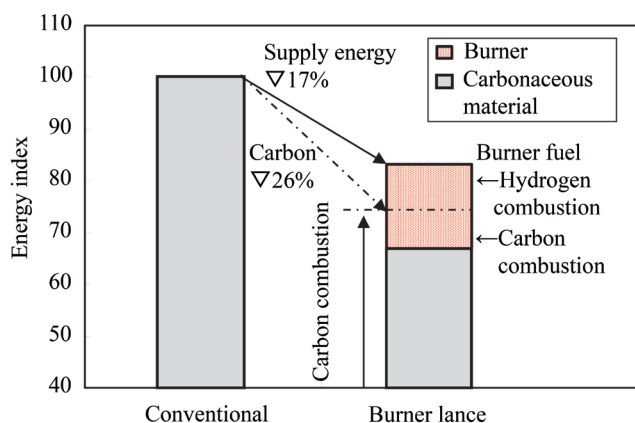


図11 溶融還元炉でのクロム鉱石量当たりの供給エネルギーの比較

4 高品質ステンレス鋼の大量生産技術

溶融還元炉で得られた含クロム溶銑は炭素を4~6%含有しており、電気炉でフェロクロムとスクラップを溶解するステンレス鋼溶製プロセスと比較して、必要な脱炭量が多い。さらに近年、製品規格炭素濃度50ppm以下の極低炭鋼の生産量が増加しており、生産性を確保しつつ高速で脱炭を行う技術の確立が必要である。

図12に上底吹き転炉での脱炭プロセスの概要を示す。炭素濃度が低下するにつれて脱炭が停滞し、クロム酸化ロスが著しくなるため、従来より、(1) 底吹き羽口から希釈ガスを供給してCO分圧を低下させる、(2) 攪拌力を増加させる、といった対策が講じられてきたが、希釈ガスの供給可能量は底吹き羽口本数によって制限されており、吹き抜け等の発生が

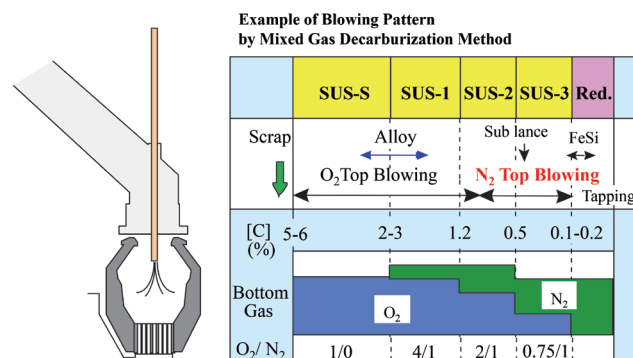


図12 上底吹き転炉での脱炭プロセスの概要

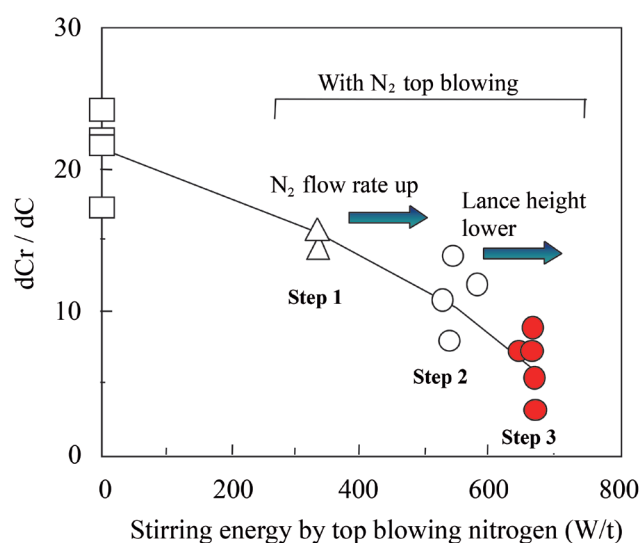


図13 低炭素濃度域でのクロム酸化量に与える上吹き窒素の攪拌力の影響

ネックとなり大幅に増加させることは困難である。

そこで当社では、低炭素濃度域でクロム酸化ロスを低減させるための技術として、上吹きランスから窒素を単独で吹き付ける技術（上吹き窒素法）を開発した¹²⁾。吹錬末期に上吹き窒素法を用いることで、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。図13に低炭素濃度域でのクロム酸化量と上吹き窒素の攪拌力を示す。上吹き窒素法では、窒素流量の増加によりクロム酸化ロスが低減された(Step1⇒Step2)が、同一の窒素流量でも、ランスを低下させハードブローにするとクロム酸化ロスがさらに小さくなった(Step2⇒Step3)。

ランス高さの影響があることから、CO分圧の希釈効果のみならず、スラグメタルの攪拌力増加の効果もあると考えられる。上吹き窒素法の開発により、溶融還元炉から生産されるクロム含有溶銑を、クロムの過剰酸化を生じることなく高速に脱炭可能となった。

前述の上吹き窒素法の開発によって、低炭素濃度域のクロ

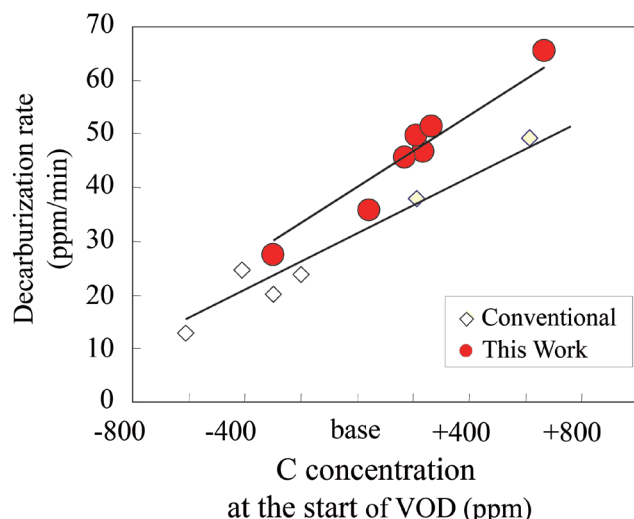


図14 合金投入方法変更による脱炭速度改善

ム酸化量は大幅に低減されたが、転炉での脱炭処理で到達可能な炭素濃度は0.1%程度が限界である。その濃度以下まで脱炭をしようとする、脱炭酸素効率の低下による転炉吹錬時間とクロム酸化ロスの著しい増加を招く。そこで、当社千葉地区第4製鋼工場においては、転炉とVODの複合脱炭プロセスを採用している。

VODでは真空中で上吹きランスから送酸を行うことにより、炭素濃度が低い領域でも高い脱炭酸素効率を得ることが可能である。これは、真空中で処理を行うことで脱炭生成物であるCOの分圧が低下し、平衡C濃度が低下するためである。しかしながら、C規格濃度が50~100ppm程度と特に低い炭素濃度を目標とするような処理においては、VODでの脱炭処理時間が長くなり、転炉や連続 casting プロセスとマッチングせず生産性が低下していた。

先に述べた平衡C濃度は高温ほど低下するが、転炉の出鋼温度を上げると、転炉や取鍋の耐火物寿命を著しく悪化させるため好ましくない。そこで、成分調整のためにVODで添加していた合金類のうち、CuやNiなど酸化ロスの恐れがない合金類を転炉で添加することで、VOD処理中の合金投入に伴う温度降下の抑制を図った。これにより、転炉での出鋼温度は一定のままで、VOD脱炭処理中の温度が約20℃上昇した。その結果、図14に示すようにVODでの脱炭速度が約15%向上し、生産性を損なうことなく、極低炭素鋼を溶製することが可能となった¹³⁾。

また、脱炭のために供給する酸素原単位の増加により、品質上有害な非金属介在物の増加が懸念されるが、VODでのスラグコントロール等によりそれらの無害化も可能になった。

5 結言

クロム鉱石を直接使用できる転炉型クロム鉱石溶融還元炉を用いたステンレス鋼溶製技術、炭化水素ガスバーナーを用いたクロム鉱石加熱添加技術、および転炉および二次精錬工程での高速脱炭技術と介在物組成コントロール技術の開発を行った。これらの開発により、有害な介在物の量が少ない高機能・高品質ステンレス鋼を高効率で溶製する技術を確立した。

また、炭化水素ガスバーナーの導入により、ステンレス鋼溶製時に必要とするエネルギー消費量を17%、炭素燃焼由来のエネルギー量を26%削減し、製造時の省エネルギー、CO₂削減等を可能とした。

今後も、本技術で開発した炭化水素ガスバーナーの適用拡大等を進め、省エネルギーやCO₂排出量削減による地球環境保護を実現し、社会への貢献を果たしていきたい。

参考文献

- 1) 岸本康夫, 田岡啓造, 竹内秀次: 川崎製鉄技報, 28 (1996), 213.
- 2) 奥山悟郎, 小笠原太, 内田祐一, 岸本康夫, 三木祐司: 鉄と鋼, 98 (2012), 627.
- 3) 奥山悟郎, 内田祐一, 小川尚志, 岸本康夫, 三木祐司: まてりあ, 52 (2013), 119.
- 4) 奥山悟郎, 小笠原太, 内田祐一, 三木祐司, 岸本康夫, 小川尚志, 金子陽平: 鉄と鋼, 100 (2014), 530.
- 5) 鉄鋼便覧 第5版, 第一巻“製鉄製鋼”, (2014), 388.
- 6) 岸本康夫, 高橋幸雄, 竹内秀次, 藤井徹也, 野崎努: 鉄と鋼, 73 (1987), A35.
- 7) Y. Kishimoto: SANO-Symposium, Tokyo, (2008).
- 8) 森岡宏泰, 寺島知道, 鍋島祐樹, 西川廣, 會田公治, 岸本康夫: 材料とプロセス, 12 (1999), 199.
- 9) 松尾充高, 斎藤力, 片山裕之, 平田浩, 金本通隆, 茨城哲治: 鉄と鋼, 76 (1990), 1871.
- 10) 平居正純, 辻野良二, 向井達夫, 原田俊哉, 大森正直: 鉄と鋼, 73 (1987), 1117.
- 11) 高柴信元, 新良正典, 小島信司, 武英雄, 吉川文明: 鉄と鋼, 75 (1989), 89.
- 12) 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), 716.
- 13) 小笠原太, 奥山悟郎, 三木祐司, 藤堂渉, 金子陽平: 材料とプロセス, 28 (2015) 654, CD-ROM.

(2021年6月2日受付)