

転炉を用いた省エネルギー型ステンレス鋼製造技術

Development of Energy-Saving Stainless Steelmaking Technology using Converter

奥山 悟郎 OKUYAMA Goro JFE スチール 経営企画部 海外事業統括室 主任部員(部長)・博士(工学)
岸本 康夫 KISHIMOTO Yasuo JFE スチール スチール研究所 研究技監・博士(工学)
三木 祐司 MIKI Yuji JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士(工学)

要旨

JFE スチール東日本製鉄所千葉地区ではステンレス鋼溶製プロセスとして、転炉型のクロム鉱石溶融還元法を採用している。本プロセスはフェロクロム合金の代替としてクロム鉱石を利用しており、当社の主原料戦略に合わせた合理的な溶製を可能としている。溶融還元炉でのクロム鉱石原単位の増加によるクロム原料の選択自由度のさらなる向上や熱源として利用している炭材の削減を目的に、炭化水素ガスを燃料としたクロム鉱石加熱添加バーナーランスを開発した。バーナーランスはバーナー火炎を介して鉱石粒子を添加することで、鉱石自体がバーナー燃焼熱の伝熱媒体として機能し、着熱効率を飛躍的に向上することが可能である。本技術の導入により、主原料選択の自由度を向上するだけでなく、従来よりも供給するエネルギーの原単位が17%低減し、溶融還元プロセスにおいて省エネルギー化を実現した。

Abstract:

The converter-type chromium ore smelting reduction method has been adopted for the stainless steel refining process at JFE Steel. Since chromium ore is used in this process as a substitute for ferrochromium alloys, this process is consistent with JFE's strategy of main raw materials for reasonable refining of stainless steel. To increase the feeding rate of chromium ore and decrease the amount of carbonaceous material used as a heat source, a burner lance for heating and feeding chromium ore was developed. The particle heated by the flame functions as a medium of heat transfer from the flame. As a result, it is possible not only to improve the flexibility of the main raw material (chromium source), but also to achieve an energy saving due to the reduction by 17% in supplied energy.

1. 緒言

JFE スチールではステンレス鋼溶製プロセスとして、クロム鉱石の溶融還元法¹⁻³⁾を採用している。本プロセスはフェロクロム合金の代替としてクロム鉱石を利用しており、クロム原料の選択自由度を向上するためにはクロム鉱石原単位の増加が重要である。クロム鉱石溶融還元プロセスは炭材を還元剤として、クロム鉱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、クロム鉱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は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、酸素供給速度の増大は主に溶鉄中の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る。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⁴⁻⁶⁾がおこなわれている。しかしながら、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、二次燃焼は炉内空間で起こっているため、クロム鉱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った。そのため、高二次燃焼操業は耐火物への熱負荷が増大し、耐火物寿命が低下するといった問題がある。

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鉱石を炉内に加熱添加することでバーナーの燃焼熱を還元反応領域へ効率的に着熱させることで、熱源として利用される炭材を削減し、省エネルギー化するための研究開発をおこなった。また、その結果を基に実機溶融還元炉へクロム鉱石加熱添加バーナーランスを導入したので、その操業結果について報告する。

2016年2月13日受付

2. クロム鉱石のバーナー加熱添加による着熱向上メカニズム⁷⁾

4t溶解炉によりバーナーによる溶銑の加熱実験を実施し、クロム鉱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。また、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実験結果と比較することで、粉粒状原料のバーナー加熱添加による、溶銑への着熱効率向上効果について定量的に検討した。

図1に4t溶解炉の実験設備の模式図を示す。溶銑上方にバーナーを設置し、バーナーによる溶銑加熱実験を実施した。また、実験に用いたバーナーは中心孔よりクロム鉱石を添加し、その外周からプロパンおよび酸素を供給する3重管構造となっている。実験条件を表1に示す。バーナーのプロパンガス流量を0.50 m³-norm./minとして、プロパン流量に対して6倍の酸素流量とした。

実験ではクロム鉱石の添加方法により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（鉱石添加なし）、2) バーナー火炎を介してクロム鉱石を添加する、「クロム鉱石加熱添加」および3) 火炎外からクロム鉱石を添加する、「クロム鉱石非加熱添加」の3条件で実験をおこなった。また、実験では実機で利用する鉱石と同様の

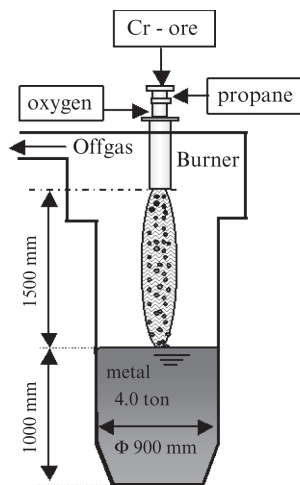


図1 実験装置の模式図

Fig. 1 Experimental apparatus

表1 実験条件

Table 1 Experimental condition

	Propane	Oxygen	Cr ore	Addition method of Cr ore
	m ³ -norm./min	m ³ -norm./min	kg/min	
No. 1	0.50	3.0	0	Without addition of ore
No. 2	0.50	3.0	3.9	With addition of heated ore by burner
No. 3	0.50	3.0	8.1	With addition of heated ore by burner
No. 4	0.50	3.0	4.5	With addition of unheated ore

平均粒子径 d_{50} が約 200 μm のクロム鉱石を用いた。

実験では溶銑温度の初期温度を 1380℃~1430℃として、バーナー加熱による昇温挙動を調査するため、適宜溶銑温度を測定した。

図2にクロム鉱石供給速度と溶銑温度上昇速度 $\Delta T/\Delta t$ の関係を示す。バーナー火炎を介してクロム鉱石を添加した「鉱石加熱添加」の場合では、溶銑温度上昇速度 $\Delta T/\Delta t$ は 2.5~2.7℃/min となり、同一鉱石添加量で比較すると、「鉱石非加熱添加」の場合よりも溶銑温度上昇速度が大きくなった。

図3にクロム鉱石供給速度と溶銑、スラグの顕熱増加量の関係を示す。ここで、スラグとは炉内に添加したクロム鉱石である。バーナー燃焼熱から溶銑、スラグへの伝熱量として、実験中の溶銑温度変化より溶銑およびスラグの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する。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、鉱石添加無しの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

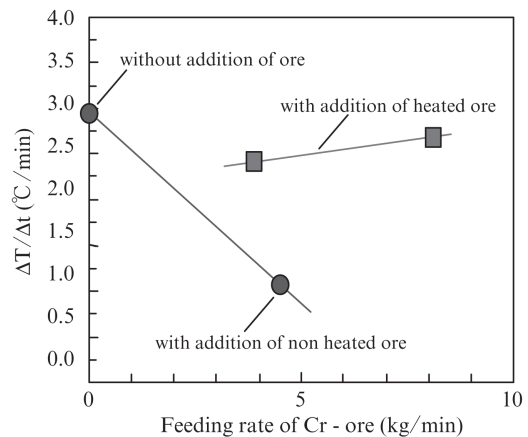


図2 クロム鉱石供給速度と溶銑温度上昇速度の関係

Fig. 2 Relationship between feeding rate of Cr-ore and temperature variation $\Delta T/\Delta t$

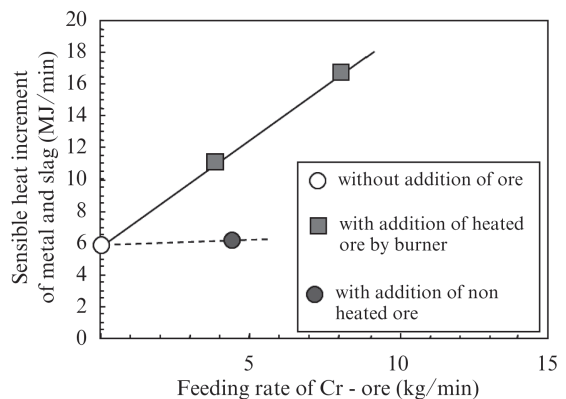


図3 クロム鉱石供給速度と溶銑、スラグの顕熱増加量の関係

Fig. 3 Relationship between feeding rate of Cr-ore and sensible heat increment of metal

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解明するため、数値計算による解析をした。数値計算では、粒子の運動方程式による粒子加熱時間、平衡計算による燃焼ガス温度および燃焼ガス-粒子間伝熱による粒子温度のそれぞれを連成して算出した⁷⁾。

図4に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を示す⁸⁾。粒子供給速度の増加にともない粒子温度、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、実験結果のバーナー燃焼熱から溶銑およびスラグへの伝熱量の内訳を算出した。ここで、加熱粒子による溶銑およびスラグへの伝熱量は数値計算で算出した粒子顕熱量とした。また、バーナー燃焼熱からの溶銑およびスラグへの伝熱量(実験結果)と粒子顕熱による伝熱量の差を火炎からの伝熱量とした。図5に溶銑およびスラグへの伝熱量の内訳と伝熱メカニズムを示す⁸⁾。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

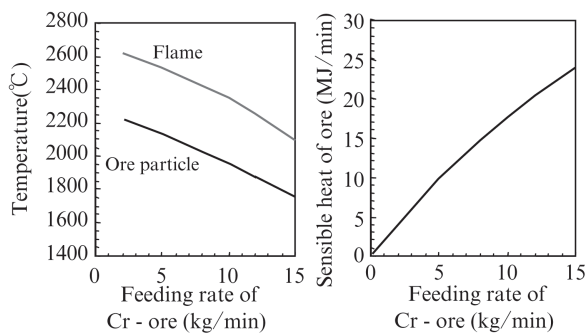


図4 鉱石供給速度と粒子温度, 全粒子顕熱量の関係

Fig. 4 Calculated temperature (particle, gas) and sensible heat of ore

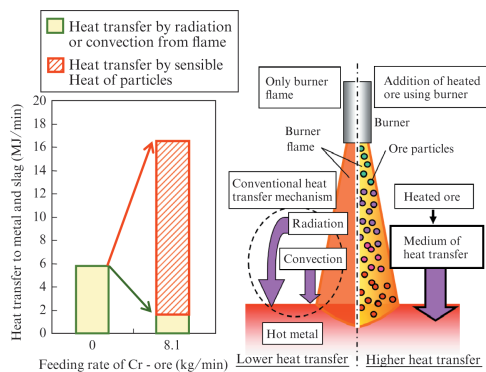


図5 溶銑およびスラグへの伝熱量の内訳

Fig. 5 Heat transfer balance and heat transfer mechanism by heated ore addition using burner

とにより、火炎温度の低下により火炎からの伝熱量が低下するものの、加熱された粒子の粒子顕熱量による伝熱量が支配的になり、トータルの伝熱量が増大した。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が溶銑へ効率的に伝熱することが可能であることを確認した。

3. 5 t 転炉実験によるプロセス設計⁹⁾

図6に5t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を示す。上吹きメインランスは4孔ストレートランスを用い、本実験ではランス先端から溶銑までのランス高さを1.5 mとした。また、クロム鉱石加熱添加バーナーランスは中心孔からクロム鉱石を供給し、その外周ノズルから燃料としてプロパンガス、および助燃剤として酸素を供給できる構造となっている。また、クロム鉱石加熱添加バーナーランスのランス高さは上吹きメインランスと同じ1.5 mとした。

実験条件を表2に示す。上底吹き酸素およびバーナー助燃剤酸素の総送酸速度を20~23 m³-norm./minとし、バーナー使用時の燃料プロパン流量を0.5 m³-norm./min、助燃剤酸素流量を3 m³-norm./minとした。また、本実験では底

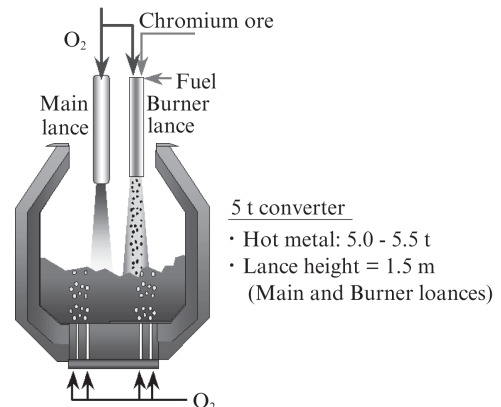


図6 5t上底吹き転炉とバーナーランスの概要

Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus of 5 t converter

表2 実験条件

Table 2 Experimental conditions

No.	Burner C ₃ H ₈	Burner O ₂	Total Cr ore	Heated Cr ore	
	m ³ -norm./min	m ³ -norm./min	kg/min	kg/min	
1	0	0	16	0	Without burner
2	0.5	3	15	0	With burner Unheated ore
3	0.5	3	16	7	With burner
4	0.5	3	15	15	With burner
5	0.5	3	23	23	With burner

吹き酸素流量を一定の条件とし、酸素流量の変更は上吹きメインランスからの酸素量を調整して行った。

実験では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調査するために、1) クロム鉱石加熱添加バーナーランスのバーナーは燃焼させず（プロパン流量 $0 \text{ m}^3\text{-norm./min}$ 、助燃酸素流量 $0 \text{ m}^3\text{-norm./min}$ ）、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) クロム鉱石加熱添加バーナーランスはバーナー点火させ、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、火炎外からを添加する「クロム鉱石非加熱添加法」の3条件で実験をおこなった。また、クロム鉱石添加速度は $15\sim 23 \text{ kg/min}$ とした。

実験では溶銑を転炉装入後、上底吹き酸素のみで所定の溶銑温度（ $1550\sim 1580^\circ\text{C}$ ）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。クロム鉱石加熱添加バーナーランスは溶融還元吹錬のみに使用した。昇熱吹錬では昇熱に必要なコークスと造滓剤を添加し、溶融還元吹錬ではクロム鉱石およびクロム鉱石の還元剤と熱源として必要なコークスを添加した。また、吹錬中に適宜溶銑温度を測定し、上記所定温度になるようクロム鉱石の添加速度を調整した。

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、有効着熱量と排ガス顕熱量（溶銑温度）を考慮し、両者の和と入熱との熱バランス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、加熱鉱石添加速度 22 kg/min の条件では有効着熱量は18%増加した。しかしながら、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。

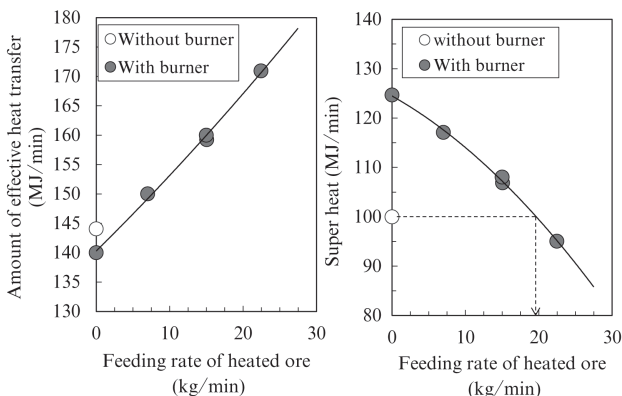


図7 加熱鉱石添加速度と有効着熱量、スーパーヒートの関係
Fig. 7 Amount of effective heat transfer and super heat

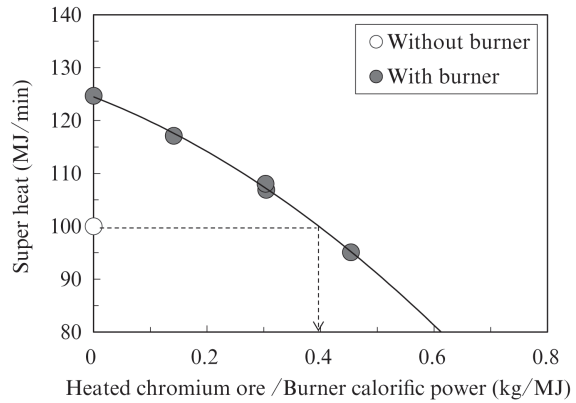


図8 加熱鉱石添加量/バーナー発熱量とスーパーヒートの関係
Fig. 8 Relationship between feeding rate of heated ore/burner calorific power and super heat

図8に加熱鉱石添加量/バーナー発熱量とスーパーヒートの関係を示す。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することが可能であることがわかる。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の適正化を実施した。

4. 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⁹⁾

以上の結果を踏まえ、JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の上底吹き転炉型（ヒートサイズ 185 t ）のクロム鉱石溶融還元炉において、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。

5 t 転炉と同様にバーナーはクロム鉱石が添加される溶融還元期で使用する。底吹き酸素量は従来と同一とし、上吹き酸素量はバーナーの助燃剤としての酸素量分を低減し、上底吹き酸素量およびバーナー助燃酸素量の総量は従来の上底吹き酸素量と同一とした。また、バーナー使用時は上吹き酸素量の低減に応じて、炭材の添加量を低下することが可能である。バーナーの燃料はプロパンガスを用いた。また、クロム鉱石は全量クロム鉱石加熱添加バーナーランスから炉内に供給することができる。

図9に 5 t 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 t 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で示したようにクロム鉱石加熱添加速度/バーナー発熱量比を 0.5 kg/MJ 以上とした。その結果、実機での操業においても、 5 t 転炉と同様にバーナー燃焼熱の着熱効率は $80\sim 90\%$ 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。

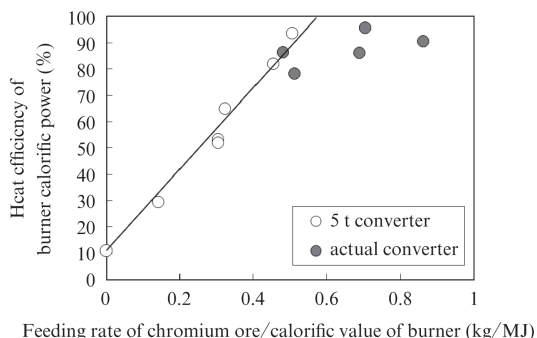


図9 5t転炉, 実機におけるクロム鉱石加熱添加速度/バーナー発熱量比とバーナー燃焼熱の着熱効率の関係

Fig. 9 Relationship between feeding rate of heated ore/burner calorific power and heat efficiency of burner calorific power

図10にクロム鉱石加熱添加バーナー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下でクロム鉱石加熱添加バーナーランス使用時では同一のクロム鉱石原単位において供給熱量が導入前と比較して17%低減し、効率的に熱供給することができ、大きな省エネルギー効果を確認できる。

図11に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、かつ鉱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効率的に伝熱することが可能となった。その結果、同一鉱石量あたりの供給エネルギー量は17%低減し、炭素燃焼由来のエネルギー量は従来法と比較して26%減少した。

以上の結果、クロム鉱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を向上するだけでなく、従

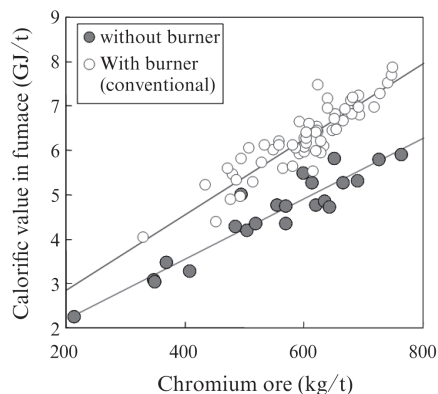


図10 クロム鉱石加熱添加バーナーランス導入前後のクロム鉱石原単位と供給熱量原単位の関係

Fig. 10 Relationship between amount of chromium ore and supplied energy into furnace

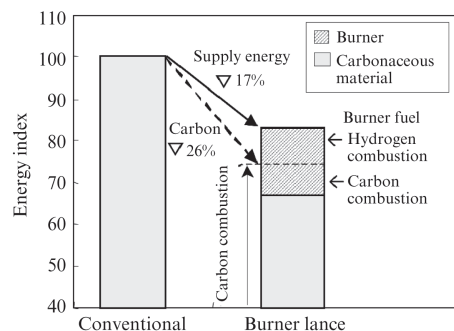


図11 溶融還元炉でのクロム鉱石量当たりの供給エネルギーの比較

Fig. 11 Comparison of index of supplied energy per amount of chromium ore

来よりも供給するエネルギーの原単位が削減し、省エネルギー化が可能になった。

5. 結言

JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の溶融還元炉において、炭化水素ガスを燃料としたクロム鉱石加熱添加バーナーランスを開発した。クロム鉱石加熱添加バーナーランスは鉱石がバーナー燃焼熱の伝熱媒体として機能するため、着熱効率が飛躍的に向上する。本技術の導入により、クロム源などの主原料選択の自由度を向上するだけでなく、従来よりも供給するエネルギーの原単位が17%低減し、溶融還元プロセスにおいて省エネルギー化を達成した。

参考文献

- 1) Taoka, K.; Tada, C.; Yamada, S.; Nomura, H.; Ohnishi, M.; Bada, H. Tetsu-to-Hagané. 1990, vol. 76, p. 1863.
- 2) Kishimoto, Y.; Taoka K.; Takeuchi, S. Kawasaki Steel Giho. 1996, vol. 28, p. 213.
- 3) Kaneko, Y.; Osame, M.; JFE Giho. 2008, no. 20, p. 79.
- 4) Matsuo, M.; Saito, C.; Katayama, H.; Hirata H.; Ogawa, Y. Tetsu-to-Hagané. 1990, vol. 76, p. 1871.
- 5) Hirai, M.; Tsujino, R.; Mukai, T.; Harada, T.; Oomori, M. Tetsu-to-Hagané. 1987, vol. 73, p. 1117.
- 6) Takashiba, N.; Nira, M.; Kojima, S.; Take H.; Yoshikawa, F. Tetsu-to-Hagané. 1989, vol. 75, p. 89.
- 7) Okuyama, G.; Ogasawara, F.; Uchida, Y.; Kishimoto, Y.; Miki, Y. Tetsu-to-Hagané. 2012, vol. 98, p. 627.
- 8) Okuyama, G.; Uchida, Y.; Ogawa, H.; Kishimoto, Y.; Miki, Y. Materia Japan. 2013, vol. 52, p. 119.
- 9) Okuyama, G.; Ogasawara, F.; Uchida, Y.; Kishimoto, Y.; Miki, Y.; Ogawa, H.; Kaneko, Y. Tetsu-to-Hagané. 2014, vol. 100, p. 98.



奥山 悟郎



岸本 康夫



三木 祐司