

水素系燃料バーナーとクロム鉱石溶融還元法による省CO₂ステンレス鋼製造プロセス

奥山悟郎¹⁾ 内田祐一¹⁾ 小川尚志²⁾ 三木祐司³⁾ 岸本康夫⁴⁾

1. 概要

JFE スチールでは、ステンレス鋼のCrなど主原料の選択に自由度を持たせることで原料の安定入手を可能とするだけでなく、エネルギー単位の削減と環境負荷を考慮して、クロム鉱石の溶融還元炉を利用したプロセスを採用している⁽¹⁾。しかし、溶融還元炉ではエネルギー源として多くの炭材(炭素系燃料)使用するといった課題があった。今回、水素系燃料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装置を開発し、従来よりも省エネ、省CO₂化可能な溶融還元技術を実用化した。

2. 開発の背景

溶融還元炉は炉内に添加される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、ステンレス鋼の主原料であるCrを回収するプロセスである。酸化クロムの炭素による還元反応は大きな吸熱を伴うため、大量の熱供給が必要である。そのため、溶融還元炉では還元剤としての炭材に加え、エネルギー源として多くの炭材が炭素系燃料として使用されている。溶融還元炉を含む転炉プロセスでは、炭素を上底吹き酸素で燃焼させる一次燃焼($C + 1/2O_2 \rightarrow CO$)と一次燃焼で発生したCOガスを上吹き酸素の一部で燃焼する二次燃焼($CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$)により熱供給される。そこで、炭素系燃料の使用量削減のために高二次燃焼技術の開発⁽²⁾が行われている。しかしながら、**図1**左図に示すように二次燃焼は炉内空間で起こるため、溶鋼やスラグへの伝熱効率が低く、耐火物への熱負荷増大により耐火物寿命が悪化する問題がある⁽³⁾。

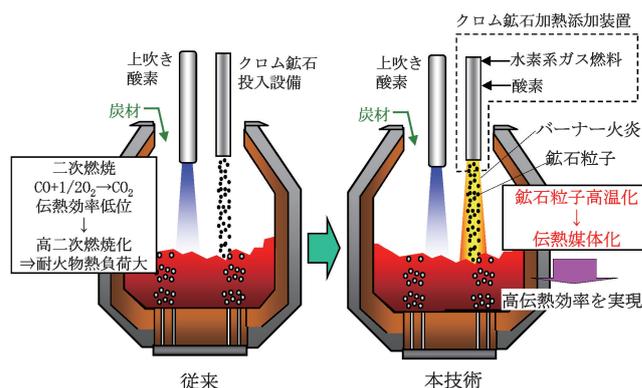


図1 クロム鉱石加熱添加装置による溶融還元法の概要。

3. 技術内容

今回開発した技術は、クロム鉱石溶融還元炉において、炭素系燃料エネルギーの一部代替として水素系燃料バーナーを利用し、かつ粉粒状の鉱石をバーナー火炎を介して添加する技術である(図1右図)。バーナー火炎のみの場合では、バーナー燃焼熱の溶銜、スラグへ伝熱効率は通常の二次燃焼と同様に低位である。それに対し、本技術ではバーナー火炎で加熱された鉱石粒子が伝熱媒体として機能し、バーナー燃焼熱を効率的に伝熱することができる。これにより従来よりも省エネ、省CO₂化が可能となる。

4. 溶解炉および試験転炉実験による検討

図2に4t溶解炉の実験設備の模式図と実験条件を示す。溶銜上方にバーナーを設置し、バーナーによる溶銜加熱実験を実施した⁽⁴⁾。バーナーは火炎とともにクロム鉱石粒子が投射できる構造となっている。燃料としてプロパンガスを用い、燃料の助燃剤としては酸素ガスを使用した。

本実験では鉱石の添加方法によるバーナー燃焼熱の溶銜、スラグへの伝熱挙動を基礎的に調査するために、(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、「鉱石加熱添加」および(3)炉上部から火炎を介せずクロム鉱石を添加する、「鉱石非加熱添加」の3条件で実験を行なった。

図3に鉱石供給速度と溶銜、スラグの顕熱増加量の関係を示す。バーナー燃焼熱から溶銜、スラグへの伝熱量として、

* JFE スチール株式会社：

1)スチール研究所製鋼研究部 主任研究員
2)東日本製鉄所千葉製鉄所製鋼部 主任部員
3)スチール研究所製鋼研究部 部長
4)スチール研究所研究企画部 理事

Development of Chromium Ore Smelting Reduction Method with Hydrogen-based Fuel Burner for CO₂ Saving Process; Goro Okuyama, Yuichi Uchida, Naoshi Ogawa, Yuji Miki, Yasuo Kishimoto(JFE Steel Corporation)
2012年10月31日受理

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。「鉍石加熱添加」条件の場合、クロム鉍石量が増大するにしたがい、溶銑およびスラグの顕熱増加量が増加することが分かる。それに対し、「鉍石非加熱添加」条件の場合では、「鉍石加熱添加」条件と比較して、同一鉍石添加量でも溶銑およびスラグの顕熱増加量が小さく、鉍石添加無しのパバーナーのみと同等であった。以上からパバーナー火炎を介してクロム鉍石を加熱しながら添加することで、パ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。

鉍石加熱添加法によるパ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⁽⁵⁾。数値計算では下記の計算を実施し、それぞれを連成し鉍石粒子温度を算出した。

- (1) 粒子の運動方程式による粒子加熱時間の算出⁽⁶⁾
- (2) 平衡計算による燃焼ガス温度の算出⁽⁷⁾
- (3) 燃焼ガス-粒子間伝熱による粒子温度の算出

図4にパバーナー加熱添加時の燃焼ガスおよび鉍石粒子温度の数値計算結果の一例を示す。パバーナー加熱添加により鉍石は溶銑に添加されるまでに加熱され、高温状態で溶銑に添加されることが分かる。図5に鉍石供給速度と鉍石粒子温度および全鉍石粒子の顕熱量の関係を示す。

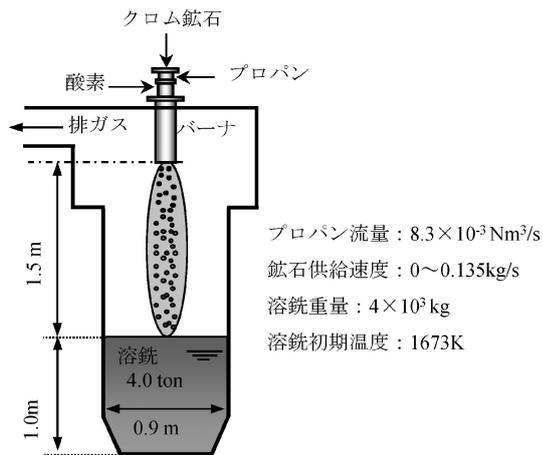


図2 実験装置模式図と実験条件。

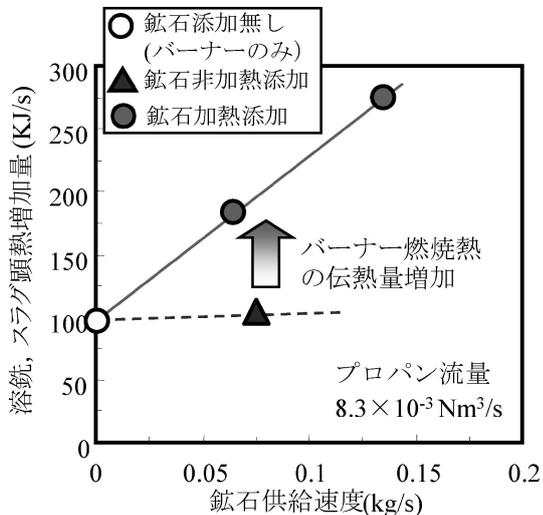


図3 鉍石添加速度と溶銑，スラグ顕熱増加量の関係。

よび全鉍石粒子顕熱量の関係を示す。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、加熱される鉍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、実験結果のパ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、パ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6にパバーナーのプロパン流量 $8.3 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ での、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。クロム鉍石供給速度が 0 kg/s (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、鉍石を加熱添加することにより、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、トータル伝熱量が増大した。以上の結果から、加熱された鉍石粒子は伝熱媒体として機能し、鉍石加熱添加法によりパ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。

次に上底吹き酸素のある転炉環境下において、鉍石加熱添加法によるパバーナー燃焼熱の溶銑，スラグへの伝熱効率を調査するために試験転炉による溶融還元吹錬実験を実施した。

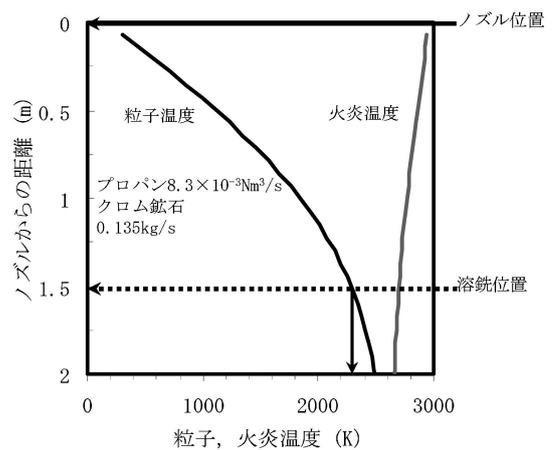


図4 パバーナー加熱添加時の燃焼ガス温度とクロム鉍石粒子温度の数値計算結果。

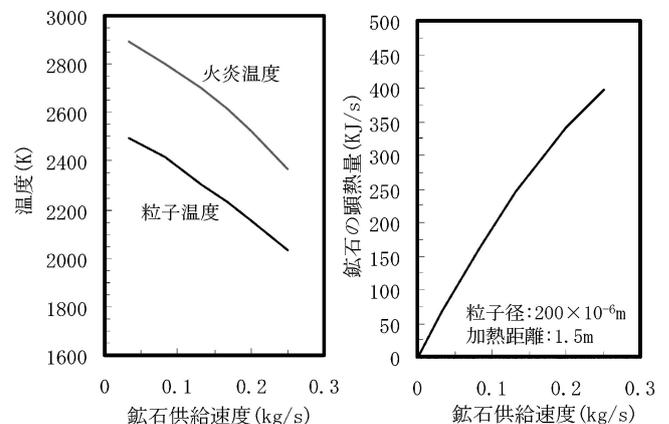


図5 鉍石添加速度と鉍石供給速度と燃焼ガス，鉍石粒子温度および全鉍石粒子の顕熱量の関係(プロパン： $0.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$)。

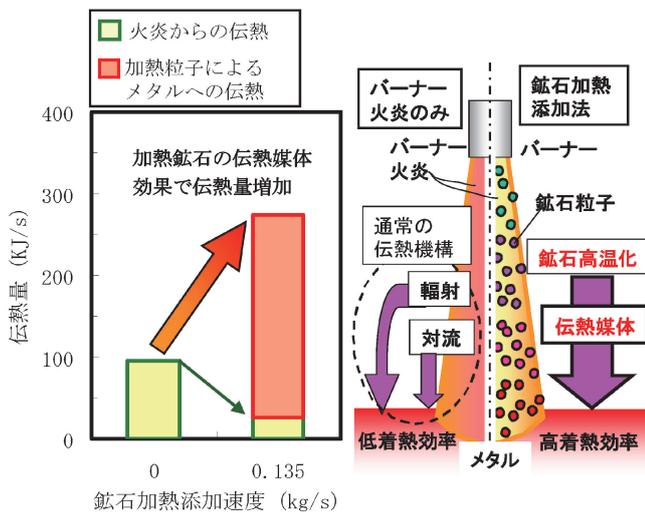


図6 バーナー燃焼熱による溶銑，スラグへの伝熱量内訳とメカニズム。

実験では、実際の溶融還元炉を模擬するため、図1右図のように上底吹き酸素転炉にクロム鉱石が投射可能なバーナーを設置した。溶銑5tを装入した後、炭材を炉内に投入しながら、クロム鉱石をバーナーでの加熱添加もしくは、炉頂から加熱せずに添加し、溶融還元吹錬を行なった。図7に試験転炉での鉱石のバーナー加熱供給速度とバーナー燃焼熱の溶銑，スラグへの伝熱効率を示す。バーナー燃焼熱の溶銑，スラグへの伝熱効率は下式より算出した。

$$\text{バーナー燃焼熱の伝熱効率 (\%)} = \frac{Q_{\text{Tot.}} - Q_{\text{O}_2}}{Q_{\text{Burner}}} \times 100$$

$Q_{\text{Tot.}}$: 溶銑，スラグへの総伝熱量

Q_{O_2} : 上底吹き酸素の炭材系燃料燃焼による伝熱量

Q_{Burner} : バーナー燃焼熱

ここで、上底吹き酸素の炭素系燃料燃焼による伝熱量はバーナー無しの条件で予め測定した値を用いた。

鉱石全量を炉頂から添加し、鉱石加熱供給速度が0 kg/sの場合、バーナー燃焼熱の伝熱効率は30%と低位であった。それに対し、鉱石加熱添加した場合には、加熱供給速度の増加ともない伝熱効率は増加し、本実験条件では最大85%の高い伝熱効率を得た。以上の結果から、上底吹き酸素のある転炉環境下においても、鉱石のバーナー加熱添加により高い伝熱効率が得られることが確認された。

4. 鉱石加熱添加技術の実用化と成果

JFE スチール 榎東日本製鉄所千葉地区のクロム鉱石溶融還元炉において、クロム鉱石加熱添加装置を実用化した。

図8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、本技術では水素系燃料の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である。その結果、本技術の導入により同一鉱石量あたりの供給エネルギー量は17%低減し、水素系燃料中の炭素分を考慮した炭素燃焼由来のエネルギー

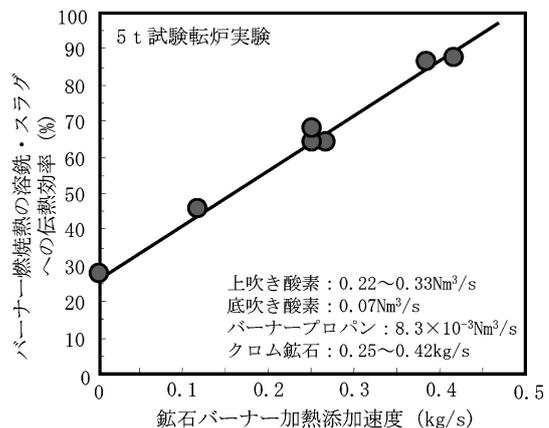


図7 5t試験転炉での溶融還元吹錬における鉱石バーナー添加によるバーナー燃焼熱の伝熱効率。

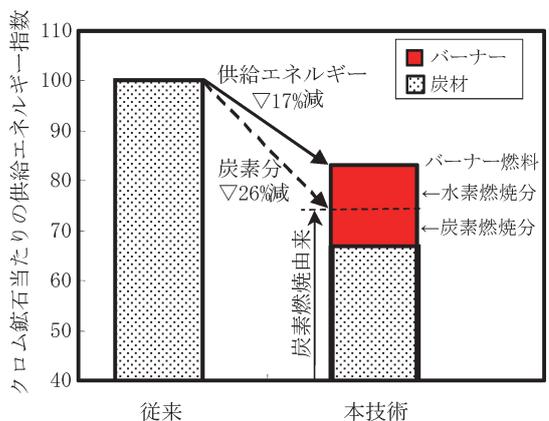


図8 溶融還元炉でのクロム鉱石量当たりの供給エネルギーの比較。

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、Cr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削減し、かつ水素系燃料の利用により炭素源燃料を大幅に削減することで、本プロセスからの二酸化炭素排出量の低減が可能となった。

5. 特 許

本技術の開発に関連した主な登録済および公開済特許を以下に示す。特許第4650226号，特許第4274020号，特許第5087955号，特開2009-14331号，特開2009-139081号，特開2010-156025号，特開2010-209436号，特開2010-215983号，特開2010-100926号，特開2012-153921号。

文 献

- (1) 金子陽平 他：JFE スチール技報，**20**(2008)，79-84。
- (2) 平居正純 他：鉄と鋼，**73**(1987)，1117-1124。
- (3) 高柴元信 他：鉄と鋼，**75**(1989)，89-96。
- (4) 奥山悟郎 他：CAMP-ISIJ，**22**(2009)，823。
- (5) 奥山悟郎 他：鉄と鋼，**98**(2012)，627-633。
- (6) Z. Tanaka: J. Chem. Eng. Jpn., **3**(1970)，261-262。
- (7) 水谷幸夫：燃焼工学第3版，森北出版，東京，(2006)，71。