

部分還元鉱石を使用する高炉製鉄プロセス

Blast Furnace Ironmaking Process Using Pre-reduced Iron Ore

国友和也^{*(1)} 高本 泰^{*(2)} 藤原保彦^{*(3)} 大沼 孝^{*(4)}
 Kazuya KUNITOMO Yasushi TAKAMOTO Yasuhiko FUJIWARA Takashi ONUMA

抄 録

天然ガスなどレス炭素エネルギーを用いて鉱石を部分還元するプロセスと、それを原料として最終還元、溶解を行う高炉プロセスとを組み合わせることにより、銑鉄製造過程におけるエネルギー源の置換および高炉の生産性とフレキシビリティの向上が図れると考えられる。このため部分還元鉱石の製造技術、使用技術に関して検討した結果、既存の高炉製鉄プロセスの省エネルギーがはかれるのみならず、部分還元鉱石製造プロセスまで含めたトータルの溶銑製造プロセスを考慮しても省エネルギー、炭酸ガス削減が可能であることがわかった。

Abstract

It may be possible to improve the productivity and flexibility of the blast furnace operation and also to substitute energy sources in the pig iron production processes by combining the partial reduction process using low carbon content energy sources such as natural gas with the blast furnace process. Therefore, the productivity of producing partially reduced ore, the composition of the partially reduced ore and the reducing agent rate in the blast furnace when the partially reduced ore was used were examined. It was found that this method not only reduces energy consumption in the existing blast furnace ironmaking process, but also reduces the energy consumption related to carbon dioxide emission in the total hot metal production processes, including the partial reduction process.

1. 緒 言

エネルギー大量消費型の素材産業である鉄鋼業は、高効率を達成した現状においても、わが国で排出される二酸化炭素の約15%を排出しており、地球環境の保全の観点からも、さらなるエネルギー使用量の削減とともにエネルギーソースの転換も考慮に入れた対応が急がれている。わが国においては、年間約8 000万トンの銑鉄が高炉を用いて製造されているが、この高炉で還元および熱源として使用されるエネルギーは、コークスや石炭といったいわゆる石炭系エネルギーが主である。これら高炉をはじめとする製鉄工程で使用されるエネルギーは製鉄所全体に投入されるエネルギーの約7割を占め、さらに製鉄工程からの排ガスを高炉ガスやコークス炉ガスとして製鉄他工程や発電所に供給しているため、製鉄プロセスのエネルギー構造を改革するには、高炉で使用する原燃料を見直す必要がある。また、良質塊鉱石が減少し難焼結性粉鉱石が増加する傾向にある鉄鉱石資源動向に対応することも求められている。

部分還元鉱石の製造と高炉での使用は、製鉄技術を現段階から飛躍的にレベルアップするために進められるべき技術の一つとして期待される¹⁾。高炉原料として部分還元鉱石を使うことは、高炉の出

銑比上昇と還元材比低減に効果的である²⁾。高炉の主要装入物である焼結鉱の原料となる粉鉱石の中には結合水やアルミナ含有量が高く焼結性の悪い粉鉱石がある。そのような粉鉱石も、部分還元鉱石とすれば、焼結機で処理することなく、高炉製鉄法において容易に使えようと考えられる。このために、高炉の羽口を活用して、還元した粉鉱石を吹き込む技術の研究、開発を行ってきた³⁻⁶⁾。

部分還元鉱石を高炉で使用することにより、既存の高炉製鉄プロセスの還元材比の低減により省エネルギーがはかれるが、部分還元鉱石製造プロセスまで含めたトータルの溶銑製造プロセスを考慮しても省エネルギーが可能であるかを検討する必要がある。つまり、高炉での還元材比の変化に加えて、部分還元鉱石製造エネルギー、海上輸送エネルギー、コークス製造エネルギー、そして焼結鉱製造エネルギーの変化などを加味することによって、トータルの銑鉄製造エネルギーの削減が可能であるかを検討する必要がある。また、部分還元で天然ガスを用いることにより、高炉法で使用される石炭の一部を実質的に天然ガスに代替することになるため、炭酸ガス発生量の削減の可能性があると考えられるが定量的には明らかではない。

このために、部分還元鉱石を使用する高炉製鉄法に関し、部分還

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター
 製鉄研究開発部 主幹研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL: (0439)80-2134

^{*(2)} 環境・プロセス研究開発センター
 エネルギー・プロセス研究開発部 主幹研究員

^{*(3)} 名古屋製鉄所 製鉄工場 グループリーダー

^{*(4)} 名古屋製鉄所 製鉄工場 マネジャー

元鉱石の製造時の生産性や部分還元鉱石の組成、部分還元鉱石を高炉で使用する場合は高炉の還元材比や生産量の変化、部分還元鉱石を羽口から吹き込むことによる高炉下部状況の変化や制約となる条件、トータルの鉄製造エネルギーおよび炭素原単位の変化などについて検討した。

2. 二段還元システムの構成と狙い

部分還元鉱石を使用する高炉製鉄法(以下、二段還元システムと称する)は、あらかじめ天然ガスなど炭素含有割合の少ないエネルギーを用いて鉄鉱石を部分還元するプロセスと、それを原料として最終還元、溶解を行う高炉プロセスとを組み合わせ二段階で還元することにより、鉄製造過程における省エネルギー、エネルギー源の置換および高炉の生産量とフレキシビリティの向上を目的としたものである。概念図を図1に示す。

部分還元工程

原料である鉄鉱石を、天然ガスから転換された水素、一酸化炭素を主成分とするガスで還元し部分還元鉱石を製造する。ここでの還元率は、還元の進行に伴う反応速度の低下が顕在化しない範囲(還元率80%程度以下を想定している)に抑制し、高生産性を狙う。還元炉は粉状の鉄鉱石を直接還元する場合は流動層方式⁵⁻⁷⁾を採用し、塊状、ペレットの場合はシャフト炉となる。

最終還元溶解工程

現状の高炉をベースに、粉状の部分還元鉱石を使用する場合は、羽口部に部分還元粉鉱石の吹き込み機能を付加する。塊状の部分還元鉱石の場合は、炉上部から装入する。いずれの場合も、石炭系主体のエネルギーにより残りの還元を行い鉄を得る。

二段還元システムの特徴は以下のとおりである。

部分還元工程では反応の終了点に近い高還元率を避け、還元反応速度の高い条件で反応させることにより、生産性が高まりエネルギー損失も少なくなる。

部分還元に留めているため還元鉱石製造時にスティッキングやクラスタリングが生じにくく操作性が向上する。

最終還元溶解工程は、既存の高炉の活用が可能であり、設備投資、開発リスクの軽減が図れる。

部分還元を行っているため、石炭系エネルギーを使用する高炉系でのエネルギー原単位の削減が可能で、二酸化炭素の発生量も減少する。また、還元負荷が軽減されるため高炉の生産性は向上する。

部分還元工程を鉄鉱石採取場近辺に設ける場合、部分還元時に除去される酸素や結合水の輸送にかかわるエネルギーが不要となる。コークス比が低下するため、石炭の輸送にかかわるエネルギーも軽減される。

焼結鉱製造に適さない鉄鉱石を部分還元用として使用することにより高炉への利用が促進されるとともに、焼結鉱用鉱石の品質確保、焼結鉱性状の向上が可能となる。

天然ガスを高炉に直接吹き込む方策は、海外の高炉では実績がある。しかし、天然ガス価格の高い日本においては経済的に成立しにくい。鉄鉱石の部分還元を天然ガスの安い海外で行うことにより、エネルギー源の転換を経済的に成り立たせることが可能となる。

また、部分還元鉱石が一般化されれば、高炉に代えて部分還元鉱石を原料とする新たな還元溶解炉(熔融還元法など)との組み合わせも可能であり、高炉と比較して小規模で柔軟性の高い新しいプロセスが生まれる素地ができるものと考えられる。

3. 要素技術の検討

部分還元鉱石を高炉で使用するにより、既存の高炉製鉄プロセスの省エネルギーがはかれるが、部分還元鉱石製造プロセスまで含めたトータルの溶鉄製造プロセスを考慮しても省エネルギーが可能であるかを検討する必要がある。つまり、高炉での燃料比の変化に加えて、部分還元鉱石製造エネルギー、海上輸送エネルギー、コークス製造エネルギー、そして焼結鉱製造エネルギーの変化を加味することによって、トータルの鉄製造エネルギーの削減が可能であるかを検討する必要がある。

このためには、部分還元に留めることで、還元鉱石の製造時の生産性がどのように変化するのか、部分還元鉱石を高炉で使用する場合は、高炉のコークス比や生産性などがどのように変化するのかを把握しておく必要がある。また、部分還元で天然ガスを用いることにより、高炉法で使用される石炭の一部を実質的に天然ガスに代替することになるため、炭酸ガス発生量の削減の可能性があり、その効果についても検討した。

3.1 部分還元鉱石の製造

通常の還元鉄は金属化率が90~95%程度であるが、これは電炉でのスクラップ代替を前提とした品位の設定である。電気炉で使用する還元鉄の金属化率が低い場合、残留FeOの還元のため熱が奪わ

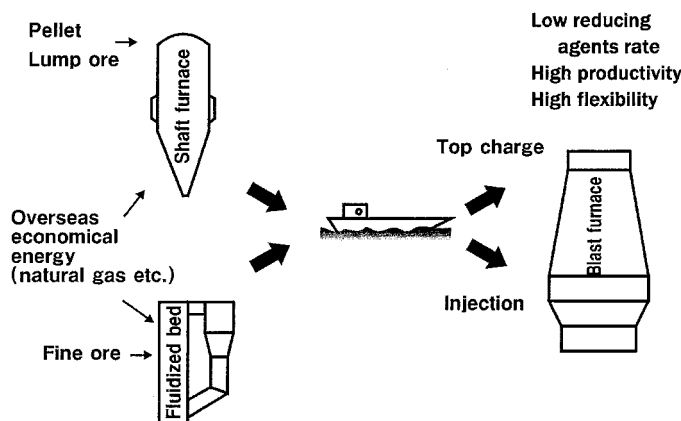


図1 二段還元システムのプロセスイメージ
Process image of two stages reduction system

れ、電力原単位が悪化するため、一定以上の金属化率が要求される。一方、基本的に酸化鉄の還元能力を有している高炉の原料として、酸化鉄の残留は問題とはならない。一般的には反応率(金属化率)が増加するほど反応速度は急激に低下するため、電炉向けの還元鉄のように高金属化率が要求される場合は、低金属化率の場合と比べて大幅に生産速度を下げなければならず、固定費負担も相対的に高くなる。このため、還元率と生産性の関係について検討した。

流動層による粉鉱石還元操作のプロセス特性を、循環流動層パイロットプラント⁶⁾により得た。この循環流動層パイロットプラントの反応領域であるライザー内径は550 mmで、ライザー高さは10 m、プラント全体の高さは約25 mである。

供給速度と還元率の関係の一例を図2に示す。鉱石供給速度0.5~1.0 t/hで製品還元率は60~90%であり、鉱石供給速度の増加に伴い還元率は低下する。これらの結果には、温度の影響や粒子ホールドアップの影響も含まれているため、反応モデルにより検討を加えた。還元モデルは化学反応律速の一界面未反応核モデルとし、滞留時間分布は完全混合モデルで評価した。このモデルで計算した還元時間と還元率との関係の一例を図3に示す。このような反応モデル

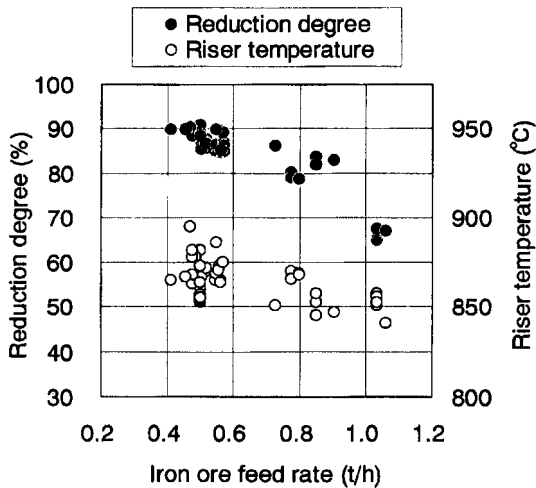


図2 鉱石供給速度の還元率と還元温度への影響
Influence of iron ore feed rate on reduction degree and temperature

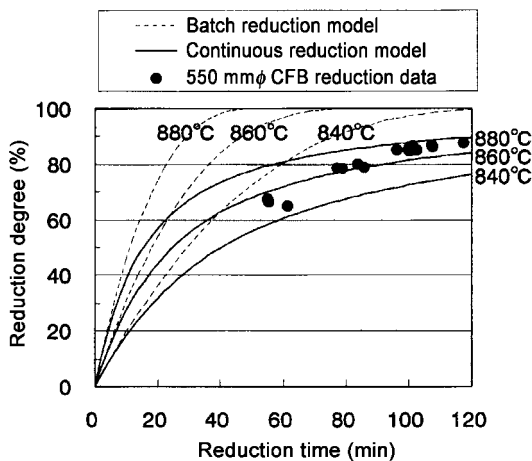


図3 滞留時間の還元率の滞留時間依存性に関する計算結果
Calculation results on relation between residence time and reduction degree

により、処理速度の増減によって生じた平均滞留時間および温度の変化と還元率との関係の推定が可能である。図3によると、還元温度880℃で還元率を90%とするには約120分の還元時間が必要であるが、還元率が60%では約20分となっている。すなわち、還元率60%での生産性は、還元率90%での生産性の約6倍となっている。

一段の完全混合流動層で還元された部分還元鉱石の鉄分の構成は、実験結果を基に解析した結果、図4であらわすことができる⁷⁾。逐次反応のバッチ還元と比べて、同じ還元率であればFe²⁺が少なく、金属鉄(M.Fe)がやや多くなるバランスとなっている。

シャフト炉の場合も、製品の金属化率を変化させれば生産量は急激に変化する。実機のデータ⁸⁾を基にした図5によると、製品の金属化率は還元温度と生産速度により決まる。同一温度の場合は、金属化率を低下させると生産速度は大幅に増加する。例えば、温度が1040Kの場合、生産速度を1400 t/dから1900 t/dまで36%増加させても、金属化率は87%から84%へと3ポイント程度しか低下しておらず、金属化率のスペックダウンの還元鉱石生産速度向上への寄与は大きい。

また、一般に鉄鉱石を流動層もしくはシャフト炉で還元する際に

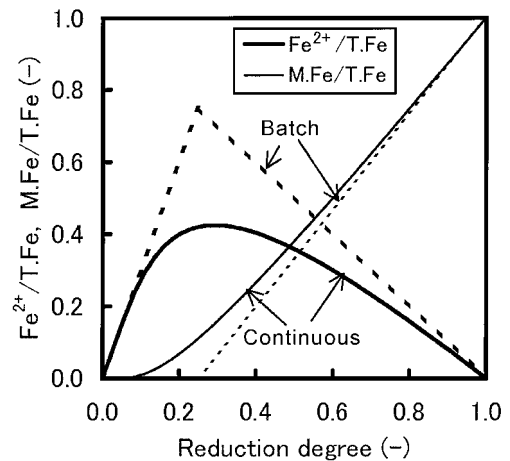


図4 還元率と鉄の構成比率との関係の計算結果
Calculated relationship between reduction degree and iron composition

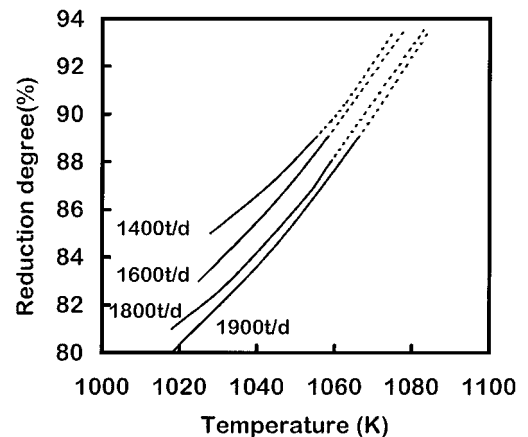


図5 シャフト還元炉における生産速度と還元率 還元温度との関係
Relation among reduction temperature, reduction degree and production rate of shaft furnace

は還元生成物の炉内でのスティッキング、クラスタリングが懸念されるが、部分還元に留めているためスティッキングやクラスタリングが生じにくく操作性が向上する効果も期待できる。

3.2 部分還元鉱石の高炉使用

溶銹 1t 当たり100 kgないし200 kgの部分還元鉱石を高炉に装入した時の効果について検討した。鉱石中の金属鉄の割合に応じてリスト線図におけるW点および炉頂のO/Feが移動するが、シャフト効率一定、微粉炭比一定として、コークス比の低下幅の計算をした。図6に示すように、部分還元鉱石の還元率が30%以上すなわち金属鉄が生成し始める還元率以上で、コークス比の低減効果は還元率にほぼ比例している。還元率の上昇に伴う高炉でのコークス比低減効果は概ねリニアであるのに対して、前述のように還元鉱石製造プロセスでは還元率の低下に伴い急速に処理速度が増加するため、部分還元鉱石と高炉との最適な組み合わせが存在すると考えられる。また、直接還元鉄の使用時⁹⁾と同じく、部分還元鉱石使用によっても還元率に応じて同一風量の下で高炉の出銹量の増加がはかれる。

羽根部から部分還元鉱石を吹き込む場合の炉下部の状況変化に関しては、高炉下部シミュレータ¹⁰⁾を用いて検討した。この実験装置は、送風羽口1本を設置した、中心角90°の扇形モデル炉で、炉床半径600 mm、羽口上部装入高さは2 000 mmである。図7に微粉炭

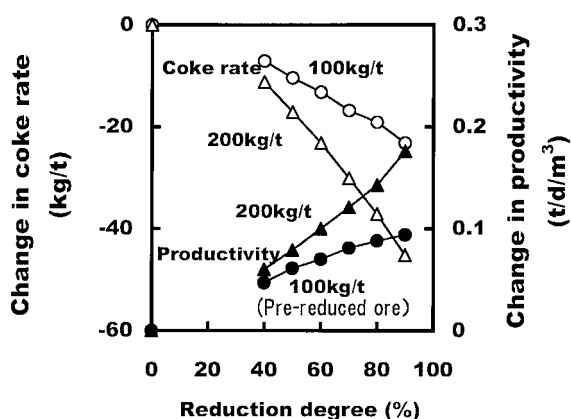


図6 部分還元鉱石の高炉使用時におけるコークス比・生産性への影響

Effect of reduction degree of charged pre-reduced ore on coke rate and productivity of blast furnace

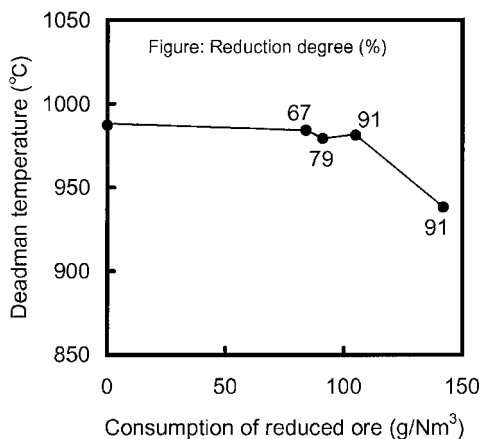


図7 部分還元鉱石吹き込み原単位と炉芯温度の関係
Relation between pre-reduced ore injection rate and deadman temperature

吹き込み量は200 g/Nm³で一定のもとで、部分還元鉱石を吹き込んだ場合の炉芯温度の変化を示す。

部分還元鉱石を吹き込んで炉芯温度は概ね維持されたが、還元率が91%の粉鉱石を142 g/Nm³吹き込んだケースは炉芯温度が低下した。この場合も、トータル熱収支を満足するように還元材比などの条件を設定しており、羽口前のフレーム温度も同一レベルであったが、炉下部での局所的な熱流比は酸素富化率の増加とともに高くなっており炉頂から装入された装入物を加熱・還元する能力が低下したことにより炉芯温度が低下した可能性がある。限界吹き込み量はその他の条件によっても当然変化するが140 g/Nm³程度以下が望ましいと考えられる。このように、羽口から部分還元鉱石を吹き込む場合は、熱的な条件からの制約があり、吹き込み可能な上限値は存在するものの、部分還元鉱石は未還元鉱石よりもその制約は緩和されると考えられる。

4. エネルギー評価

結合水とAl₂O₃含有量の高い焼結原料である西豪州産のピソライト粉鉱石を、循環流動層で天然ガスの改質ガスを用いて現地還元率60%まで部分還元し、130 kg/tの原単位で高炉で使用した時のエネルギー原単位や炭素原単位の変化について検討した¹¹⁾。この際、海外で安価なエネルギーを用いて製造した部分還元鉱石を日本に輸送し、日本国内の高炉で利用することにより、高炉コークス比の削減、コークス製造エネルギーの低減が図れる。また、焼結鉱比の低下により焼結鉱製造エネルギーが低下する。鉱石を部分還元することで、結合水と酸素の一部が除去されることにより、鉱石の海上輸送エネルギーの一部が省略可能であり、コークス比の削減により石炭輸送エネルギーの一部省略が可能となる。

部分還元プロセスは、予熱流動層一段、還元流動層一段からなる流動層プロセスを前提とした。天然ガスの酸素による部分燃焼ガスと、部分還元炉排ガスを脱炭酸・脱水し予熱した循環ガスとを混合して還元ガスとした。

図8に部分還元鉱石製造時のエネルギー原単位を示す。一次エネルギーとしては、還元ガス製造工程での天然ガスが主であるが、鉱石予熱、循環ガス予熱でも天然ガスが使用され、その他、酸素製造、発電のための一次エネルギーとして天然ガスが使用される。還元率60%の部分還元鉱石1tを製造するためのエネルギー消費量は

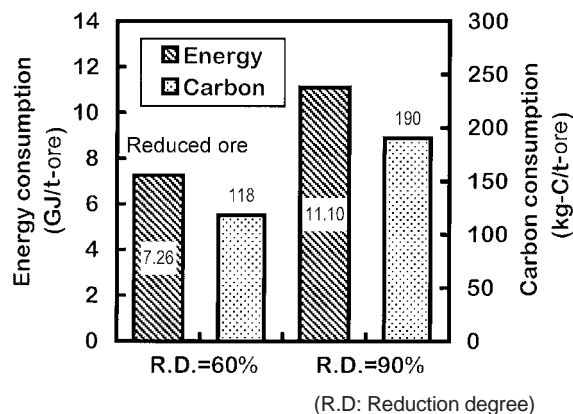


図8 部分還元鉱石製造時のエネルギー原単位と炭素原単位
Energy consumption and carbon consumption required to produce partially reduced ore

表1 部分還元鉱石使用時の製鉄プロセスにおける原単位推定結果
Estimated consumption of ironmaking processes when partially reduced ore is used

		Base	Pre-reduced ore
Blast furnace			
Coke rate	kg / t-pig	370	352
Pulverized coal rate	kg / t-pig	145	145
Pre-reduced ore	kg / t-pig	0	130
Sinter	kg / t-pig	1211	1042
Other ore	kg / t-pig	404	404
Blast volume	Nm ³ / t-pig	982	936
Oxygen	Nm ³ / t-pig	37	38
Electric power	kWh / t-pig	32	32
Coke oven			
Coal	kg / t-pig	585	556
Fuel	Mcal / t-pig	332	310
Electric power	kWh / t-pig	20	19
Steam	kg / t-pig	20	19
Sintering plant			
Ore	kg / t-pig	1258	1082
Fine coke	kg / t-pig	39	31
Anthracite	kg / t-pig	21	18
Electric power	kWh / t-pig	42	36
COG	Nm ³ / t-pig	2	2

7.26 GJ, 炭素消費量は118 kgとなると評価された。

製鉄プロセスで部分還元鉱石使用時の各プロセス諸元を表1に示す。還元率60%の部分還元鉱石を130 kg/t-pig使用することにより、高炉においては、微粉炭比一定ではコークス比が370 kg/t-pigから352 kg/t-pigに低下し、焼結鉱原単位は1 211 kg/t-pigから1 042 kg/t-pigに減少する。コークス比の低下、焼結鉱使用量の減少に伴い、コークスでの石炭及び燃料使用量、焼結機でのコークス、無煙炭及び電力原単位が低減する。

この結果、既存の製鉄プロセスでのエネルギー原単位が17.02

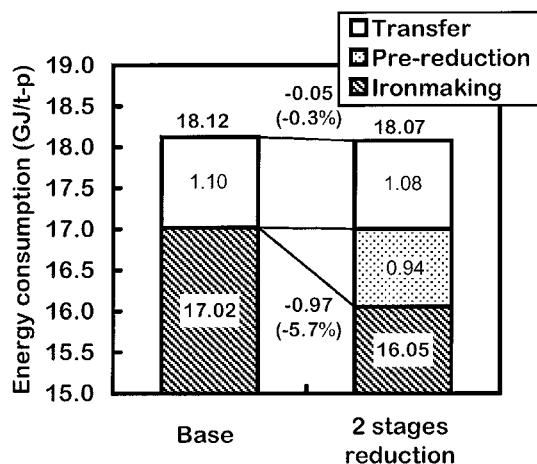


図9 二段還元システムとベース操業のエネルギー原単位の比較
Comparison of energy consumption under the base conditions and for the two-stage reduction system

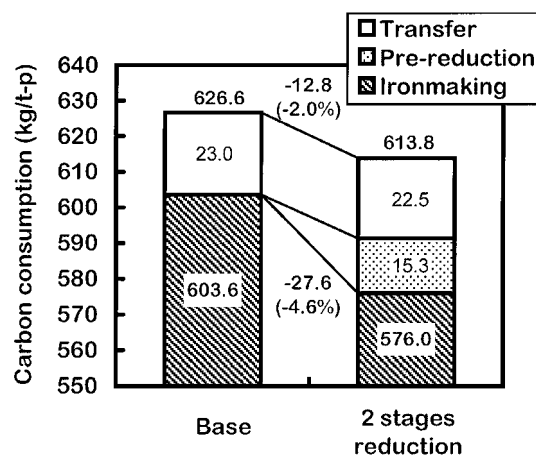


図10 二段還元システムとベース操業の炭素原単位の比較
Comparison of carbon consumption under the base conditions and for the two-stage reduction system

GJ/t-pから16.05 GJ/t-pへと0.97 GJ/t-p, 約6%低下する(図9)。これに、部分還元鉱石の製造に要するエネルギー0.94 GJ/t-pおよび海上輸送エネルギーの減少分0.02 GJ/t-pを考慮すると、トータルのエネルギー原単位は0.05 GJ/t-p, 約0.3%低下する。

同様に、既存の製鉄プロセスでの炭素原単位は604 kg-C/t-pから576 kg-C/t-pへと28 kg-C/t-p, 約5%低下する(図10)。これに、部分還元鉱石の製造に要する炭素原単位15.3 kg-C/t-pおよび海上輸送所要炭素原単位の減少分0.5 kg-C/t-pを考慮すると、トータルの炭素原単位は12.8 kg-C/t-p, 約2%低下する。

5. 結 言

天然ガスなど炭素含有量の少ないエネルギーを用いて鉱石を部分還元するプロセスと、それを原料として最終還元、溶解を行う高炉プロセスとを組み合わせることにより、鉄鋼製造工程におけるエネルギー源の転換および高炉の生産量とフレキシビリティの向上を目指した二段還元システムについて検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 還元鉱石の製造プロセスにおいて、高還元率を避け、還元反応速度の高い部分還元に留めることにより、単段の流動還元プロセスにおいても生産性が高められ金属鉄あたりのコストが低減できる可能性がある。
- (2) 高炉での部分還元鉱石の使用技術に関して、部分還元鉱石を多量に吹き込めば炉芯温度の低下を招く可能性があるが、一定の範囲内では還元材比の低下、生産量の向上、炉下部通気性の改善が可能である。
- (3) 二段還元システムは、既存の高炉製鉄プロセスの省エネルギーがはかれるのみならず、部分還元鉱石製造プロセスまで含めたトータルの溶銑製造プロセスを考慮してもエネルギーおよび炭酸ガスの削減が可能であると考えられる。

石炭系のエネルギーへの依存度を低下させる二段還元システムが工業的に成立するためには、部分還元鉱石の製造技術、使用技術を確立するとともに、相当規模のものが経済的に製造、使用できることを精度良く見極めることが重要である。このためには、部分還元鉱石の製造、貯蔵、使用技術の評価、鉄鋼製造エネルギーの評価、プロセス設計、システム全体のフィジビリティスタディーなど残

された検討課題も多い。しかし、資源、エネルギーが制約されているわが国にとって、国際的な分業を構成し、海外現地最有利エネルギーを活用するとともに、既存の装置、インフラストラクチャ - を最大限に活用した製鉄プロセスの構築が重要かつ現実的な問題となってきているものと考え。

参考文献

- 1) 林 敏:鉄と鋼 54, 1017(1968)
- 2) 重見彰利:製鉄ハンドブック 地人書館,東京, 1979, p.199
- 3) Okuno, Y., Yamaguchi, K., Takamoto, Y., Kunitomo, K.: Blast Furnace Injection Symposium, AISE. PA, 1996, p.97
- 4) Takamoto, Y., Kunitomo, K., Yamaguchi, K., Okuno, Y., Yamamoto, T., Egashira, T.: Proc. 1st Int. Con. on Science and Technology of Ironmaking. ICSTI '94, ISIJ, Sendai, 1994, p.146
- 5) 国友和也, 林洋一:CAMP-ISIJ. 1, 127(1988)
- 6) 高本泰, 国友和也, 江頭達彦, 大塚一:鉄と鋼 87, 403(2001)
- 7) Kunitomo, K., Hayashi, Y.: Preprint of the 2nd SCEJ symp. on C. F. B. 1988, p.125
- 8) 奥野嘉雄:私信
- 9) 大沼孝, 藤原保彦, 国友和也, 高本泰, 西村恒久:CAMP-ISIJ. 14, 207(2001)
- 10) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二:鉄と鋼 77, 1609(1991)
- 11) 高本泰, 国友和也:CAMP-ISIJ. 14, 205(2001)