

フェロコークスの製造および高炉使用

Ferro Coke Production and Its Evaluation in Blast Furnace Utilization

廣澤 寿幸 HIROSAWA Toshiyuki JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
庵屋敷孝思 ANYASHIKI Takashi JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (部長)
佐藤 道貴 SATO Michitaka JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)

要旨

鉄鋼業では CO₂ 排出量の削減と原料の安定供給が大きな課題となっており、CO₂ 排出量が多い製鉄工程の高炉では低還元材比操作が必要であることから、実現手段として高反応性を特徴とする炭材と鉄が共存する新しい塊成化原料であるフェロコークスの高炉使用が有用であると考えられる。

本稿では、実験室規模で製造したフェロコークスの反応性および強度に及ぼす鉱石配合比率の影響に関する基礎検討を行い、また、フェロコークスと室炉コークスの反応挙動を基にした高炉 2 次元モデルを構築し、炉内での反応挙動および強度変化を予測した。これらの結果に基づきフェロコークスの製造プロセスを構築し、実高炉でのフェロコークス使用による高炉還元材比削減を実現した。

Abstract:

In recent years, the reduction of CO₂ emissions and the stable supply of raw materials are two major issues for the steel industry. Low reducing agent operation in the blast furnace is required to reduce CO₂ emissions in ironmaking. In order to achieve this with using low-grade raw materials, ferro coke characterized by high coke reactivity is considered to be useful.

In this paper, the effect of ore ratio on the reactivity and strength of ferro coke produced in the laboratory was investigated. The two-dimensional blast furnace model based on the reaction behavior of ferro-coke and conventional coke were constructed, and the reaction behavior and strength change in the furnace were predicted. Based on these results, the ferro coke production process was established, and the reducing agent ratio was reduced by using ferro coke in the actual blast furnace.

1. はじめに

現在、鉄鋼業では地球温暖化に代表される環境問題への対応が必須であり、中でも温室効果ガスである CO₂ の削減は重要な課題となっている。鉄鋼業における CO₂ 発生量は日本国内における全発生量の約 15% を占め¹⁾、中でも製鉄工程からの排出量はそのうちの約 7 割を占めている。これらの課題を解決する手段の一つとして、近年、高炉操業温度の低温化を可能とする反応性に富んだ革新的原料を製造し高炉で使用する革新的製鉄プロセスが提案されている。上記の革新的原料の一形態であるフェロコークス²⁻⁴⁾ は、鉄の触媒効果により、通常室炉コークスと比べて低温からの炭材の反応が期待でき、新たな高炉装入物として使用することで熱保存帯温度の低下を介した還元材比低減効果が期待できる⁵⁻¹³⁾。

本稿では、実験室規模で製造したフェロコークスの反応性および強度に及ぼす鉱石配合比率の影響に関する基礎検

討を行い¹⁴⁾、また、フェロコークスと室炉コークスの反応挙動を基にした高炉 2 次元モデルを構築し、炉内での反応挙動および強度変化を予測¹⁵⁾ した。これらの結果に基づき、フェロコークスの製造プロセスを構築し、実高炉におけるフェロコークス使用による高炉還元材比削減を実現した。

2. フェロコークスの概念と特徴

本報告で使用するフェロコークスは、高炉用原料として従来から使用されている焼結鉱やコークスとは異なる新しい塊成化原料である。特に高炉での機能を大きく改善することを目的とし、製造および使用方法に特徴があるもので、Carbon Iron Composite と呼ばれるものの一種である。図 1 に概念を示す。近年、炭材内装鉱 (Carbon composite)、金属鉄を含有した部分還元焼結鉱 (Partially reduced sinter) など、複合的な高炉用原料が提案されている^{16, 17)}。コークス、焼結鉱などの従来原料は強度、反応性など特定の性状を強化したものであるのに対し、これらの複合的な原料は炭材と酸化鉄が共存した、あるいは金属鉄を部分的に含有

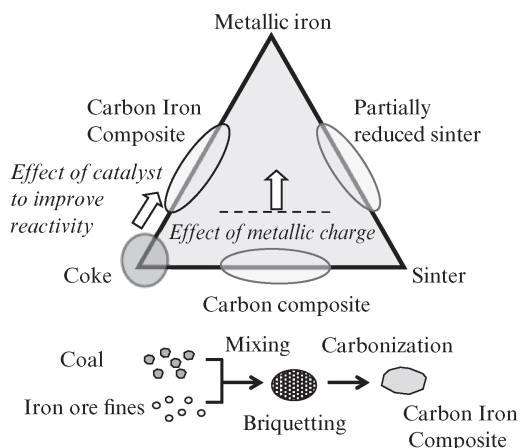


図1 通常高炉原料とCICの比較概念図

Fig. 1 Conception of CIC compared with conventional burden

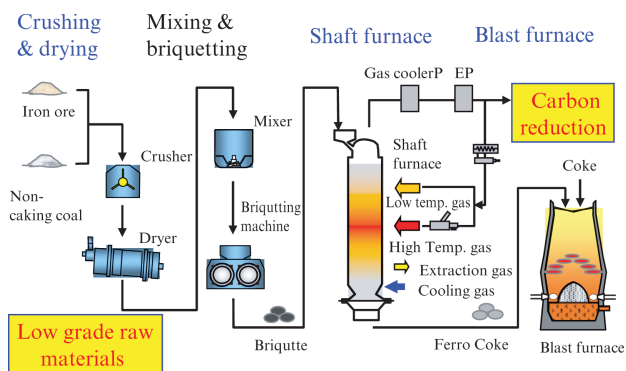


図2 フェロコークス製造および高炉使用のプロセスイメージ

Fig. 2 Process flow the Ferro Coke production

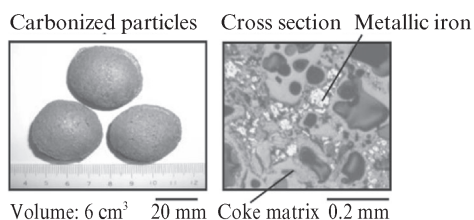


図3 フェロコークスの外観と組織

Fig. 3 Appearance of Ferro Coke

した酸化鉄の構造であることから、高炉内での還元反応を促進させることで還元負荷軽減が期待できる。図2に、本技術のプロセスフローを示す。安価な鉄鉱石および非微粘結炭を粉碎、混合、ブリケット化し、シャフト炉で加熱、乾留し、Carbon Iron Compositeの一種であるフェロコークスを製造する。フェロコークスは高炉用原料であるため、強度は重要な性状となるが、ブリケット化による圧密効果とシャフト炉による比較的精度の高い温度制御により、劣質な原料を使用しても従来の室炉コークスと同等の強度で製造できる。図3にフェロコークスの外観を示す。含有する鉄鉱石は、乾留過程ではほぼ金属鉄まで還元される。高炉内でのフェロコークスの使用方法として、焼結鉱や塊鉱石からなる鉱石層中に混合しての使用を想定している。高炉内では、フェロコークスが高反応性および低温から始まるソリュションロス反応を活かして鉱石還元反応の促進と保存帯温度制御を担い、室炉コークスが通気・通液性の確保を担うという機能分化を考えている。

3. フェロコークス強度・反応性評価実験

3.1 フェロコークス製造試験

本実験で使用するフェロコークスは、表1および表2に示す石炭A、Bおよび鉄鉱石を表3に示す割合で使用したものである（表および図においてはフェロコークスをFCと記載する。Ferro Coke）。バインダーとして軟ピッチおよびアスファルトピッチを用い、添加量は5~7 mass%とした。石炭を3 mm以下に粉碎し、鉄鉱石を所定量配合した混合原料を使用し、双状ロール成型機で6 cm³の卵形に、成型圧4~5 t/cm²で成型した。約3 kgの成型物を粉コークス中に投入して乾留缶（幅200×奥行200×高さ245 mm）に充填し、炉壁温度1000℃で6時間乾留し、フェロコークスを得た。この条件は、炭中温度の測定結果から900℃で3時間保持したことに相当する。また、高炉内での反応性および反応後強度をフェロコークスと比較するため、実機コークス炉で製造したコークスをサンプリングし、20±1 mmに整粒して使

表1 石炭性状

Table 1 Properties of coals

	Mean maximum reflectance in oil, Ro (%)	Gieseler lastometry maximum fluidity, MF (ddpm)	Volatile matter, VM (mass%) dry basis	Ash (mass%) dry basis
Coal A	0.72	307	36.1	8.4
Coal B	1.80	0	11.2	8.6

表2 鉄鉱石性状 (mass%)

Table 2 Chemical composition of iron ores (mass%)

	T.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	S	Na	K
Ore	67.5	0.21	0.01	1.31	0.73	0.01	0.033	<0.01	<0.01	<0.01

用した。

3.2 フェロコークスの品質評価試験

鉱石配合比率の異なるフェロコークスの強度について、I型試験機（φ 130 mm×700 mm）を用いて所定の回転数で回転強度試験を行い、所定粒度での残存率を評価した。600回転後の10 mm 篩い上重量の供試重量に対する百分率を指数 I_{10}^{600} として評価した。また、上記フェロコークスについて図4に示す荷重軟化試験装置を用い、図5に示すとおり高炉内の条件を模擬したガス組成で反応試験を行った¹⁴⁾。

表3 原料の配合比率 (mass%)
Table 3 Blending conditions of raw materials (mass%)

Sample	Blending ratio				Iron ore ratio
	Coal A	Coal B	Ore	Binder	
FC-1	66.5	28.5	—	5.0	0.0
FC-2	59.8	25.7	9.5	5.0	9.5
FC-3	46.5	20.0	28.5	5.0	28.5
FC-4	33.2	14.3	47.5	5.0	47.5
FC-5	45.6	19.5	27.9	7.0	27.9

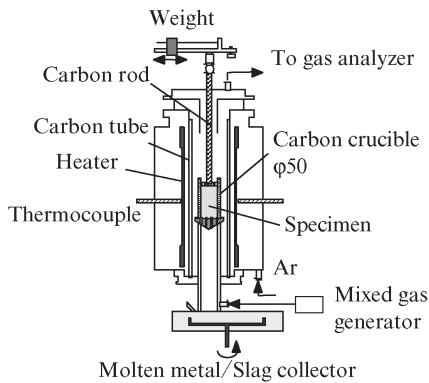


図4 荷重軟化試験装置の概略図

Fig. 4 Schematic illustration of under-load reduction test system

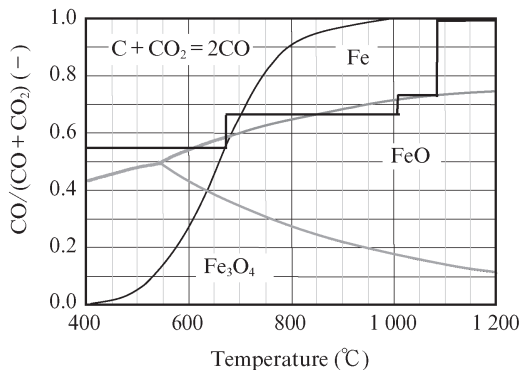


図5 実験における温度・ガス濃度条件

Fig. 5 Gas composition of experimental condition

フェロコークスは粉碎して6~8 mmとした。実験中および反応後のガスは、赤外分析計を用いてCOおよびCO₂を分析した。排ガスのカーボン濃度および酸素バランスからカーボンソリュションロス反応による室炉コークスおよびフェロコークスのガス化反応量を定量化した。本実験でのガス量は11.8 NL/minとした。荷重軟化試験での昇温速度は900℃までは9.0℃/min、900~1100℃は2.3℃/min、1100℃以上では4.2℃/minであった。

フェロコークスFC-5について、上記荷重軟化試験装置を用いて室炉コークスとの反応性の違いを評価した。本試験では、フェロコークスは粉碎せず用いた。また、反応後強度を評価するため、970~1250℃の温度一定の条件でCO 30vol.%-CO₂ 30vol.%-N₂ 40vol.%の雰囲気中で反応試験を行い、反応率と反応後強度の関係を調査した。強度は上記I型試験機により I_{10}^{600} として評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 鉱石比率のフェロコークス反応挙動影響

鉱石の配合比率の異なるフェロコークス（FC-1~FC-4）の鉱石配合比率と強度の関係を図6に示す。FC-1~FC-4は同じ石炭配合であるが、鉱石の配合比率が高いほど、乾留後のフェロコークスの強度が低下している。野村らも、微粉鉱石添加量の増加に伴い乾留後の成形物の強度が低下することを報告している¹¹⁾。特に、鉱石を47.5 mass%添加したFC-4で、 I_{10}^{600} が20程度と著しく低い。鉱石として添加した鉄は、乾留前にはほぼFe₂O₃であったが、乾留後には金属化率が80%程度になるまで還元が進行していた。このことから、原料中の鉱石の比率が高くなると、還元反応で鉱石の周囲の炭素を消費すること、石炭の溶融性が低下すること^{18, 19)}、および乾留によりコークス化して強度を発現する炭素質の比率が減少すること、などによりフェロコークスの強度が低下したと考えられる。

ガス化反応が開始する温度に及ぼす鉱石配合比率の影響を検討するために、鉱石配合比率の異なるフェロコークス

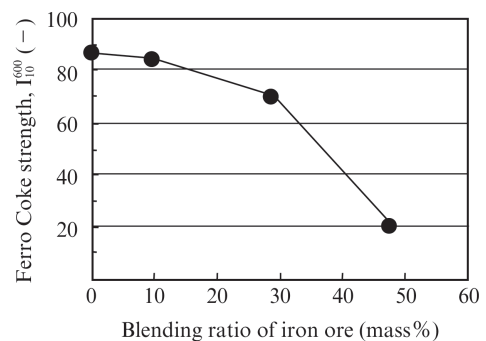


図6 鉄鉱石比率とフェロコークス強度の関係

Fig. 6 Effect of iron ore ratio on Ferro Coke strength

(FC-1~FC-4)を用いて1200℃まで荷重軟化試験を行った。図7に温度とコークスのガス化反応速度の関係を示す。鉱石を含まないFC-1はガス化反応温度が一番高く、鉱石を配合したFC-4, FC-3, FC-2は鉱石配合比率が高い順に低温からガス化反応を検知していることから、鉱石配合比率が高いほど低温からガス化反応が起こったと言える。図7に示すガス化反応速度からガス化反応の開始温度を定量化した。今回の試験条件では、分析計の分解能から反応速度 10^{-5} s^{-1} 程度が検出限界と考えられるが、低温での測定結果にばらつきがあったため、反応速度が $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となる温度を反応開始温度とした。図8に原料中の鉱石配合比率と反応開始温度の関係を示す。原料中の鉱石配合比率が高い方が反応開始温度は低くなっているが、その関係は直線的ではなく鉱石の配合比率が高くなると図8の傾きが小さくなる傾向があった。野村らもコークス中配合比率が高いほど反応開始温度が低下することを報告している¹¹⁾。鉱石を含まないFC-1の反応開始温度は950℃であり、鉱石の配合比率28.5 mass%のFC-3では反応開始温度が約150℃低下している。また、荷重軟化試験と同様の試験条件で反応試

験を行い、その際のコークスおよびフェロコークスの重量変化を測定した結果、試料の重量減少が0.1 mass%となった温度は、室炉コークス970℃に対して鉱石の配合比率28.5 mass%のFC-3では140℃低い830℃であった。室炉コークスと鉱石を含まないフェロコークス(FC-1)とでは若干反応性が異なるものの、原料中に鉱石を含まないコークスもしくはフェロコークスと比較して鉱石の配合比率28.5 mass%のFC-3では140~150℃低温からガス化反応が開始していることがわかった。荷重軟化試験での反応開始温度と鉱石配合比率の関係から、鉱石の配合比率が高い方が反応開始温度を低温化できることがわかったが、高炉での使用を考えた場合、乾留後の強度も重要である。室炉コークスでは、 I_{10}^{600} が80以上であるのに対して鉱石を47.5 mass%添加したFC-4では I_{10}^{600} が20程度と著しく低く、高炉での使用は困難と考えられる。双方を考慮すると、今回試験に使用したフェロコークスでは、鉱石配合比率28~29 mass%が妥当であると考え、以降、この条件でフェロコークス使用時の高炉評価を実施した。

4.2 フェロコークスと室炉コークスの反応性測定結果

フェロコークスと室炉コークスの反応開始温度を測定するためFC-5および室炉コークス単味の高炉内のガスおよび温度条件を模擬した荷重軟化試験を行った結果を図9に示す。いずれの試料も、温度上昇に伴い、赤外ガス分析によって求めたガス化反応割合が増加した。装入した炭素の0.1 mass%が反応した温度を反応開始温度として整理した結果、FC-5の反応開始温度は824℃、一方、室炉コークスは973℃であり、フェロコークスは室炉コークスよりも反応性が高いことを確認できた。

4.3 反応後強度の測定結果

高炉内でのコークスの品質評価として、粉発生抑制の観点から、反応後強度を回転強度により評価している。FC-5

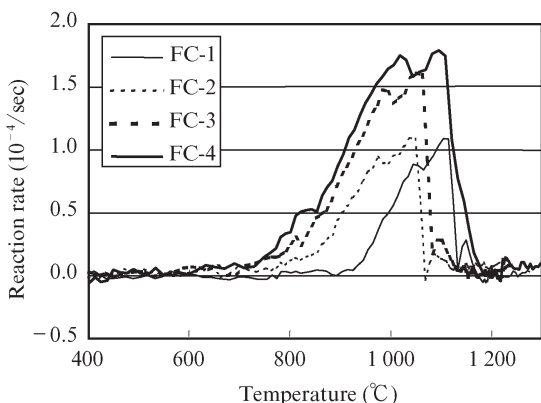


図7 ガス化反応性に及ぼす鉱石比率の影響

Fig. 7 Effect of iron ore ratio ore on reaction rate of Ferro Coke

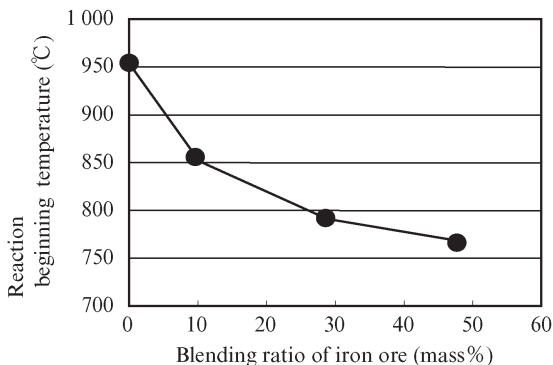


図8 ガス化開始温度に及ぼす鉱石比率の影響

Fig. 8 Effect of iron ore ratio on reaction beginning temperature of Ferro Coke

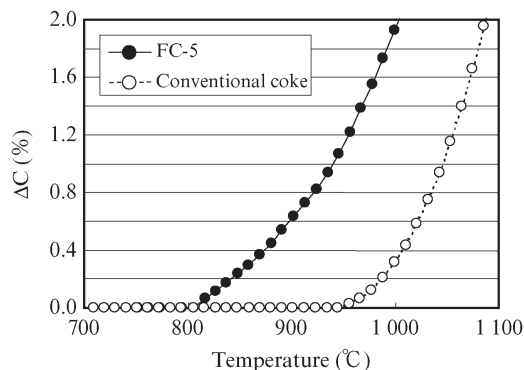


図9 フェロコークスと室炉コークスのガス化反応性

Fig. 9 Comparison of reaction beginning temperature between Ferro Coke and conventional coke

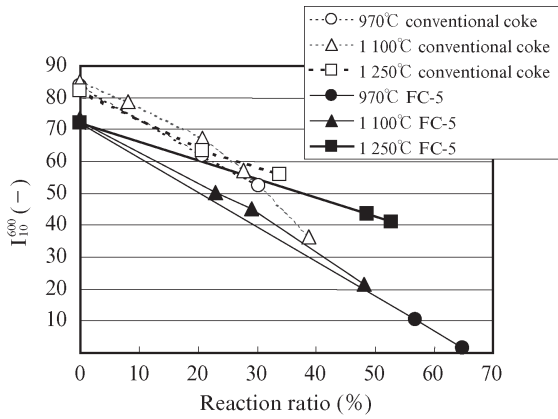


図 10 フェロコークスと室炉コークスの反応後強度

Fig. 10 Relationship between reaction ratio and strength after reaction

および室炉コークスについて、上述の反応後強度を評価するため、温度一定の条件で反応試験を行った。それぞれの条件で反応時間を変えて反応率を変化させ、反応率と反応後強度の関係を調査した。図 10 に実験結果を示す。フェロコークス、室炉コークスのいずれの試料でも、反応率が高いほうが反応後強度は低くなっている。しかし、図 10 の傾きである反応率 1% 増加に対する強度の低下は、試料および反応温度により異なっていることがわかる。

5. 高炉内フェロコークス反応挙動の検討

FC-5 を高炉で 101 kg/t-pig の原単位で使用した場合を前提に、上記の実験結果に基づきベース条件に対してガス化開始温度が 150°C 低下すると仮定し、炉内状況を高炉 2 次元モデル²⁰⁾ で推定した。計算条件および結果を表 4 に示す。ここで表 4 の Case に示す Reducing agent rate (RAR) は、FC-5 に相当する鉱石を配合したフェロコークスを含む値で示した。ガス化開始温度を 1050°C としたベース条件に対して、同温度を 900°C とした条件で計算した。表 4 に示すとおり、溶銹温度は上昇した。図 11 に無次元半径 0.75 の位置における、高炉の高さ方向での温度分布およびコークスのソリューションロス反応 ($C+CO_2=2CO$)、溶融還元反応 ($FeO+C=Fe+CO$) の反応速度分布を示す。高さ方向の温度勾配が小さくなる領域の温度、いわゆる熱保存帯温度は約 150°C 低下している。また、コークスのガス化開始温度の低温化に伴いソリューションロス反応は増加するが、鉱石の還元反応も低温から進行し融着帯下端に相当する 1400°C での鉱石の還元率が上昇するため、FeO との溶融還元反応は減少している。結果として、間接還元率が上昇し、表 4 に示したとおり溶銹温度が上昇した。次に、計算結果に基づいて、高炉の高さ方向でのフェロコークスおよび室炉コークスの反応率を検討した。高炉内ではフェロコークスが室炉コークスに優先して反応する^{11, 12)} ものとし、荷重軟化試験

表 4 高炉モデルによる計算条件および結果

Table 4 Calculation conditions and results with 2-dimensional blast furnace model

Calculation conditions		Base	Case
Coke rate	(kg/t-pig)	368	266
Pulverized coal rate	(kg/t-pig)	126	126
Ferro Coke rate	(kg/t-pig)	0	101
Reducing agent rate	(kg/t-pig)	494	493
Thermal reserve zone temp.	(°C)	1 050	900
Results		Base	Case
Hot metal temp.	(°C)	1 502	1 511
Production	(t/day)	12 250	12 340

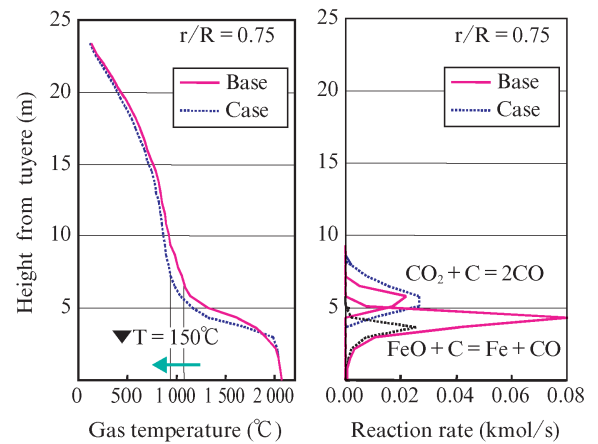


図 11 フェロコークス装入による炉内温度、反応挙動

Fig. 11 Changes in gas temperature and reaction rates with Ferro Coke charging

の結果から、融着帯下端におけるフェロコークスの反応率を 52% と仮定した。また、溶融還元反応は溶融 FeO との接触が律速していると仮定し、フェロコークスと室炉コークスの反応速度は同じとした。これらの仮定に基づき、フェロコークスおよび室炉コークスの高さ方向での平均反応率を求めた結果を、ベース条件と比較して図 12 に示す。上述のとおりソリューションロス反応は増加するが、溶融還元反応は減少し、フェロコークスおよび室炉コークスを合わせた平均反応率は、反応開始温度の低温化によりベース条件に比べて小さくなる。各位置での温度とフェロコークスおよび室炉コークスそれぞれの反応率の変化に基づき、図 10 より強度低下を推算した。ただし、フェロコークス、室炉コークスとも反応率増加に対する強度の低下は、970°C 以下および 1250°C 以上の温度では一定とした。図 12 に高炉の高さ方向でのフェロコークスおよび室炉コークスの平均強度の推測推移を示す。コークスのガス化開始温度の低温化に伴い、ソリューションロス反応の反応位置が上方に移るため、強度低下が起こる位置も上方にずれる。また、図 11 の炭材の消費について着目すると、ソリューションロス反応量がベース条

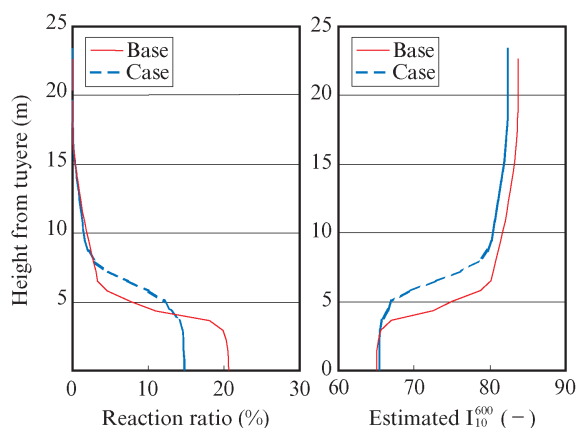


図 12 フェロコークス装入による計算反応率および強度

Fig. 12 Changes in reaction ratio and estimated coke strength with Ferro Coke charging

件に比べて増加するので、フェロコークスおよび室炉コークスのソリューションロス反応による強度の低下は、ベース条件に比べて大きくなるが、溶融還元による反応量はベース条件に比べて大きく減少するので、両方の反応を合わせた強度低下は減少する結果となった。一方、溶融還元反応では、ソリューションロス反応に比べて、コークスの強度低下が小さくなるとの報告²¹⁾もあり、溶融還元反応による強度低下については、今後精査する必要がある。

6. 実証試験

6.1 30 t/d 規模フェロコークス製造と高炉使用

30 t/d 規模のフェロコークス製造設備を東日本製鉄所（京浜地区）に建設し、30 t/d の製造能力の実証と大型高炉でのフェロコークス使用試験を実施した。フェロコークスは2100 t程度作りだめし、5日間、実高炉での使用試験を行った。図13にフェロコークス使用前のベース期間およびフェロコークス使用期間の微粉炭比、コークス比、高炉炉体形状や温度圧力を補正した通気抵抗指数 $F2^{22)}$ および溶銑温度の平均値の変化を示す。期間①ではフェロコークスと微粉炭を置換し、期間②ではフェロコークスとコークスを置換し、高炉の通気抵抗を悪化させることなく、フェロコークス高炉使用による還元材比低減を実高炉で実現した。

6.2 300 t/d 規模フェロコークス製造と高炉使用

2017年よりNEDO助成事業“環境調和型プロセス技術の開発（フェロコークス技術の開発）”に着手した。製造規模を拡大した300 t/d規模の設備を西日本製鉄所（福山地区）に建設し、フェロコークス製造技術を確立させ、また大型高炉へ連続的に長期装入した時の高炉の還元材比や操業安定性に及ぼす影響を確認していく。

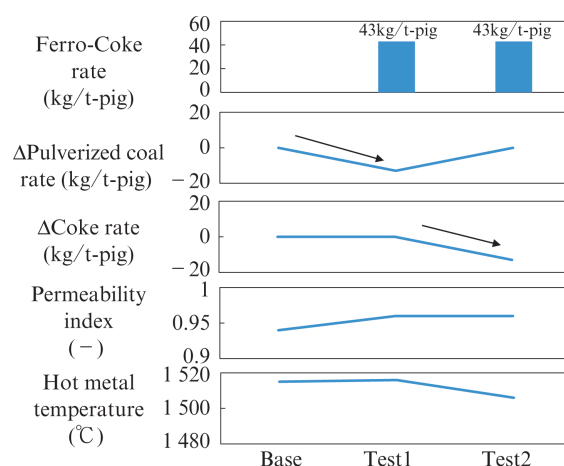


図 13 フェロコークス装入による実機操業結果

Fig. 13 Operation results of charging Ferro Coke in blast furnace

7. おわりに

実験室規模で製造したフェロコークスを用いた、各種条件での反応および強度試験、高炉2次元モデルによる高炉内での反応挙動の推定、実操業でのフェロコークス使用時の還元材比影響調査の結果、以下の知見を得た。

- (1) 鉱石の配合比率の高いフェロコークスの方が低温からガス化反応が起こる。鉱石比率28.5 mass%を含むフェロコークスは、鉱石を含まない試料に比べて約150℃低温から反応が開始する。
- (2) 高炉2次元モデルにより、フェロコークス使用時の高炉内挙動を推定し、ガス化開始温度の低温化に伴う熱保存帯温度の低下効果およびソリューションロス反応の増加と溶融還元反応の減少による間接還元率の向上効果を確認した。また、反応後強度を推定した結果、101 kg/t-pigのフェロコークス使用量では室炉コークスのみを使用した場合とほぼ同等の反応後強度であることがわかった。
- (3) フェロコークス製造設備を建設し、フェロコークスの製造および大型高炉での使用試験を行い、還元材比低減を確認した。2017年より300 t/d規模の製造プロセスの開発に着手し、長期装入の高炉操業影響を今後確認していく。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成により得られたことを記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 地球環境研究センター, 国立環境研究所. 日本国温室効果ガスインベントリ報告書. 2012-04
- 2) 小林勝明, 奥原捷晃. 溶融還元用炭材としての成型フェロコークスの基礎検討. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 1991, vol. 4, no. 4, p. 1123.
- 3) 深田喜代志, 下山泉, 浅沼稔, 庵屋敷孝思, 有山達郎, 花岡浩二. 鉄内装型コークス製造プロセスの開発. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2004, vol. 17, no. 4, p. 842.
- 4) 野村誠治, 寺島英俊, 佐藤英二, 内藤誠章. 高反応性フェロコークス製造技術の基礎検討. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 849-856.
- 5) 内藤誠章, 岡本晃, 山口一良, 山口剛史, 井上義弘. 高反応性コークス使用による高炉内反応効率向上技術. 鉄と鋼. 2001, vol. 87, no. 5, p. 357-364.
- 6) Ujisawa, Y.; Nakano, K.; Matsukura, Y.; Sunahara, K.; Komatsu, S.; Yamamoto, T. Subjects for Achievement of Blast Furnace Operation with Low Reducing Agent Rate. ISIJ Int. 2005, vol. 45, no. 10, p. 1379-1385.
- 7) 有山達郎, 佐藤道貴, 佐藤健, 渡壁史朗, 村井亮太. 今後の高炉操業に望まれるコークス性状. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 3, p. 114-121.
- 8) 野村誠治, 樋口謙一, 国友和也, 内藤誠章. フェロコークスの強度とガス化反応特性 (還元平衡点制御手段の研究1). 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2008, vol. 21, no. 2, p. 894.
- 9) 樋口謙一, 野村誠治, 国友和也, 内藤誠章. フェロコークス使用による熱保存帯温度低下 (還元平衡点制御手段の研究2). 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2008, vol. 21, no. 2, p. 895.
- 10) 佐藤健, 山本哲也, 藤本英和, 庵屋敷孝思, 佐藤道貴, 武田幹治. フェロコークスの使用による還元材比低減. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2009, vol. 22, no. 1, p. 5.
- 11) 野村誠治, 樋口謙一, 国友和也, 内藤誠章. 革新的新塊成物による高炉熱保存帯温度低減効果. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2009, vol. 22, no. 2, p. 746.
- 12) 野村誠治, 樋口謙一, 国友和也, 内藤誠章. 成形フェロコークスの反応挙動と高炉熱保存帯温度低減効果. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, no. 12, p. 813-820.
- 13) 埜上洋, 山本哲也, 宮川一也. 高炉操業およびコークス反応挙動に及ぼすコークス反応性の影響解析. 鉄と鋼. 2010, vol. 96, no. 5, p. 319-327.
- 14) 山本哲也, 佐藤健, 藤本英和, 庵屋敷孝思, 佐藤道貴, 武田幹治. 原料性状がフェロコークス反応挙動に及ぼす影響. 鉄と鋼. 2010, vol. 96, no. 12, p. 683-690.
- 15) 山本哲也, 佐藤健, 藤本英和, 庵屋敷孝思, 深田喜代志, 佐藤道貴, 武田幹治, 有山達郎. フェロコークスの反応挙動と高炉内評価. 鉄と鋼. 2011, vol. 97, no. 10, p. 501-509.
- 16) 笠井昭人, 内藤誠章, 松井良行, 山形仁朗. 炭材内装熱間成型ブリケットの昇温条件下での還元・浸炭挙動. 鉄と鋼. 2003, vol. 89, no. 12, p. 1212-1219.
- 17) 佐藤秀明, 町田智, 主代晃一, 市川孝一, 佐藤道貴, 有山達郎, 武田幹治. 部分還元焼結鉱の製造技術および品質の評価. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 815-824.
- 18) 神成尚克, 高草木啓太, 尾崎純一, 原田靖之, 安楽太介, 藤本英和. グニエラ炭のコークス化に及ぼす Fe_2O_3 および $CaCO_3$ 添加の影響. 鉄と鋼. 2010, vol. 96, no. 5, p. 249-257.
- 19) 野村誠治, 寺島英俊, 佐藤英二, 内藤誠章. 高反応性フェロコークス製造技術の基礎検討. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 849-856.
- 20) 佐藤健, 野内泰平, 木口満. 高炉操業シミュレータの開発と溶銹シリン低減への適用. 川崎製鉄技報. 1997, vol. 29, no. 1, p. 30-36.
- 21) 笠井昭人, 木口淳平, 上條綱雄, 清水正賢. 高炉融着帯・滴下帯領域での溶融酸化鉄によるコークスの劣化. 鉄と鋼. 1998, vol. 84, no. 10, p. 697-701.
- 22) 国分春生, 佐々木晃, 田口整司, 樋谷暢男. 装入物の軟化溶融過程から見た加湿送風の高炉操業への影響. 鉄と鋼. 1982, vol. 68, no. 15, p. 2338-2345.



廣澤 寿幸



庵屋敷孝思



佐藤 道貴