

TODAY

はじめまして ～技術の交流と新分野開拓の難しさ（その1）～



経済産業省 製造産業局
製鉄企画室長 竹上 嗣郎

はじめまして。去る6月28日に経済産業省製鉄企画室長を拝命しました竹上です。これからどうぞ、よろしくお願ひします。私の略歴については、（最近ではネット情報も多岐にわたりますし）報道等でご覧になっているかと思ひます。大変恐縮ですが、製鉄分野は未経験でもありますところ、前職の東北大学未来科学技術共同研究センターの副センター長としての経験をもとにお話させていただくことで、今回はご容赦いただければと思ひます。

東北大学未来科学技術センターは、産学連携分野では大変有名な組織であり、国内で産学連携のさまざまな仕組み、今となっては当たり前の仕組みを、先導的に取り組むことにチャレンジしている研究センターです。知財管理部門の充実、外部資金を活用した研究者の登用などは、ともすると硬直的になりがちな大学組織にあって、当時は大きな風穴を開けることになりました。私が着任してからも、その取り組みは継続しており、「次世代移動体プロジェクト」に見られるように、「次世代」と「移動」をキーワードに、さまざまな研究者が融合的な取り組みを進めています。そこに情報が集まり、発信され、そしてさらに研究求心力が高まります。当たり前のようですが、その仕組みをビルトインすることの重要性をこのプロジェクトは示唆しています。

さて、分野を問わず、個々の技術は近年ますます高度化、深化し、たとえば学会という大きなくくりでの同じ研究分野の研究者であっても、相互理解

が十分できないような状況になっているように見えます。当然の帰結として、それぞれが、世界レベルでの専門家の高みを目指す中、その専門性の最先端にたどりついて競争のスタートに立つまでに、多大な時間とお金を消費せざるを得ない時代になったと私はみえています。そうすると複数の研究者の連携は、大変高いハードルになってくことは自明であり、ましてや、新分野開拓を目指して「異なる分野の研究者を融合したプロジェクト」となると、その仕組み設計次第で、スタート段階からプロジェクトは大きな成否の分かれ道に立つことでしょう。

7月某日、着任初として日本冶金工業(株)様の大江山事業所を訪問させていただきました。戦前に海外から輸入した技術を引き継ぎ、進化させてきたことへの、長年のご努力に頭が下がりますとともに、先人の先見の明にも大変感心させられた次第です。ひるがえって、先に述べた理屈に立てば、新分野開拓へのハードルはその分、高いものと推察します。高い専門性もさることながら、長い経験に裏打ちされた確立した技術分野における、チャレンジの難しさ。これは鉄鋼業界に共通の現象なのかどうか、と逡巡しつつ、帰路についた次第です。そのあとも、ご配慮いただき、いくつかの事業所を訪問させていただいておりますが、重ねてその思いを強くする次第です。

いずれにせよ、業界によって置かれている状況は様々かと思ひます。鉄鋼・製鉄業界として、私の指摘が当たっているところ、はずれているところ、あるかと思ひます。どなたか、ご教示いただけるとありがたいですし、ご指名ありましたら、次の機会に、また違った視点から、本件の続きをお話させていただく機会が持てればと思ひます。

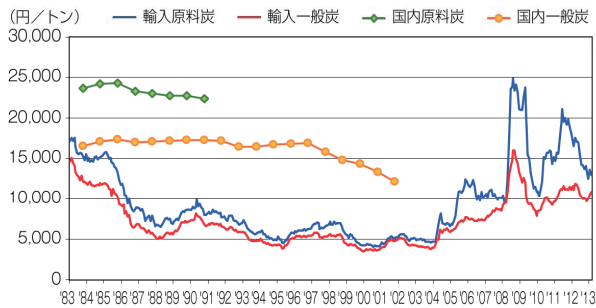
**資源対応力強化、二酸化炭素排出削減のための革新的製鉄プロセス開発
- フェロコークスプロセス開発、平成 21 年度～平成 24 年度の成果 -
JFE スチール（株） 武田 幹治（プロジェクトリーダー）**

1. はじめに

日本の製鉄分野の歴史を振り返ると、川崎製鉄千葉工場に象徴される臨海製鉄所の建設による高度成長、石油危機によるオイルレス操業、微粉炭多量吹き込み操業へのシフトを経て、高炉操業を取り巻く環境は大きく変化してきた。高度成長期には重油吹き込みによる還元材比低減、高出鉄比への挑戦が求められ、還元材コスト削減のため微粉炭多量吹き込み技術の開発が行われてきた。

その後、地球温暖化対策、2000 年以降の中国、インドの急激な経済成長により、製鉄を取り巻く環境は大きく変化した。具体的な課題は①地球温暖化対策としての製鉄プロセスでの大幅な二酸化炭素排出削減、②中国、インドの急激な経済成長に伴う鉄鉱石、石炭などの資源需給の逼迫と価格の高騰である。

図 1 にエネルギー白書から抜粋した石炭価格の推移を示す。高度成長期から長期にわたって 5 千円/t 程度であった輸入原料炭の価格は急上昇し、09 年のピーク時には 2 万 4 千円/t、直近でも 1 万 4～5 千円/t と高騰を続けている。鉄鉱石価格も同様に高騰し、日本の鉄鋼業の国際競争力を大きく損なう要因となっている。このような背景のもと、資源対応力強化、二酸化炭素排出抑制をキーワードとする本革新的製鉄プロセス開発プロジェクトが提案、開発が進められてきた。本報告では、プロジェクトの概要、主要な成果について述べる。



出典：経済産業省 エネルギー白書2013

図 1 最近の石炭価格の高騰例

2. 先導研究（平成 18 年～20 年度）

高炉の還元材比の低減、安価資源活用による資源対応力強化は普遍的な研究課題であり、1970 年代から多くの研究開発が実施されてきた。原料品質向上、操業改善による高炉の低炭素化は還元平衡の理論限界、熱収支の限界に近くなっており、さらなる大幅な削減は期待できない。このため、二酸化炭素排出量を抜本的に削減できるブレークスルー技術の創出を目指して、産、官、学が

一体となった取り組みが行われてきた。

「高炉のエネルギー半減、環境負荷ミニマム」を目指した研究が 1988 年から 5 年間にわたって科学技術振興調整費総合研究として実施された。引き続いて鉄鋼協会研究会「鉱石・炭材の近接配置による高炉の還元平衡制御」（平成 19 年度から平成 22 年度）では、炭材、鉱石の距離を短縮することによるガス化反応、還元反応への影響が系統的に研究された。

図 2 に近接配置による還元反応制御の概念を示す。通常の高炉では、鉱石とコークスは層状に装入され、上部から装入された鉄鉱石は下部から上昇する高温の還元ガス (CO, H₂) により還元される。その際に生成した CO₂ の一部は共存するコークスと再度反応し、CO に戻る反応が起こる。その鉱石とコークスの距離を通常 10cm オーダーから μm オーダーに短くすることにより、これらの還元反応、CO₂ の反応を高速化、高炉の還元材比の低下に役立つことが明らかにされた。

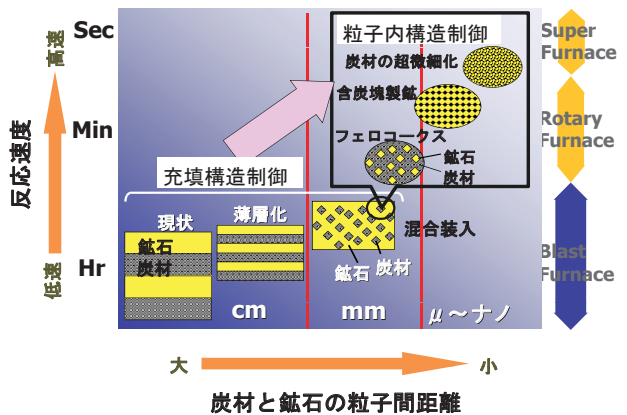


図 2 炭材 / 鉱石近接化による反応の高速化と効果

これらの基礎研究と並行して、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託研究として「革新的製鉄プロセスの先導的研究」が平成 18 年度に組織され、高炉の低炭素化、資源対応力強化にむけた革新的塊成物の提案と製造原理の構築が平成 20 年度まで行なわれた。炭材中に金属鉄を分散させたフェロコークス、鉱石中に炭材を分散させた含炭塊成鉱の製造法、その熱保存帯温度低下、還元材比低下効果が定量的に評価され、熱保存帯温度 150℃の低下、還元材比低減 35kg/t が高炉シミュレータ (BIS) 炉で確認された。先導的研究については JRCM NEWS¹⁾ に掲載されているので参照されたい。

鉱石中に炭材を分散させた含炭塊成鉱については、結合材としてセメントを用いるセメントボンドと石炭の熱可塑性を利用する熱間成型ブリケット²⁾の 2 種類あり、い

いずれも実高炉での使用試験が行われている。横山ら³⁾は、含炭塊成鉱を 21,000t 製造し、大分第 2 高炉で使用試験を行い含炭塊成鉱中炭素 1kg/t あたり、0.36kg/t の炭素量削減を確認している。

参考文献

- 1) 内藤 誠章：JRCM NEWS 2009、No. 268
- 2) A. Kasai, H. Toyota, K. Nozawa and S. Kitayama: ISIJ Int., 51(2011), 1333.
- 3) H. Yokoyama, K. Higuchi, T. Ito and A. Oshio: ISIJ Int., 52(2012), 2000.

先導的研究の成果を発展させるため、パイロット規模でのフェロコックス製造技術の開発と高炉操業技術の開発を行うために提案されたのが本プロジェクト「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」であり、平成 21 年度に開始、平成 24 年度に終了した。

3. プロジェクトの概要

フェロコックスとは、低品位の石炭と鉄鉱石を原料とし、成型、乾留によりコックス中に金属鉄を分散させた高炉原料である。金属鉄が高炉での還元反応を速めるため、従来よりも少ないコックス量（炭素量）で酸化鉄を還元できることから、二酸化炭素排出量の大幅削減と省エネルギーを実現できる。また、劣質石炭・劣質鉄石など幅広い資源を活用することができる。図 3 に示すように通常の装入物である焼結鉱、コックスに対して、高反応性の第 3 の装入物としてコックスの一部を代替、還元材比低減に寄与することを目的としている。

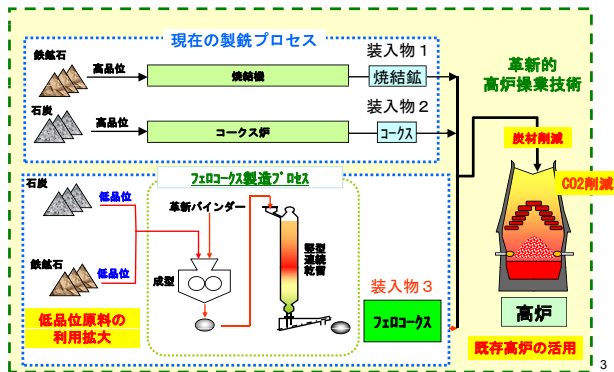


図 3 革新的製鉄プロセス（フェロコックス）概要

図 4 にフェロコックスによる還元材比低減の機構を模式的に示す。高炉では、通常のコックスの一部を「フェロコックス」に置き換えて使用する。操業中の高炉内では、一酸化炭素 (CO) による鉄鉱石 (焼結鉱) の還元反応の進行により、二酸化炭素 (CO₂) が発生している。「フェロコックス」内部に含まれている超微粒の金属鉄は、この CO₂ がコックス (C) と反応し還元ガス (CO) を再生成する反応 (C+CO₂=2CO) の触媒 (*1) となり反応速度を大幅に向上させる。その結果、CO 濃度が上昇し、鉄鉱石 (焼結鉱) の還元反応は低温度でも進行するようになり、少ないコックスで酸化鉄の還元ができ、還元材比の大幅な低減が期待でき、CO₂ 排出削減、省エネに寄与する。

(*1) 触媒作用 : 金属鉄 (Fe) が酸化反応 (1)、還元反応 (2) を繰り返すことにより、全体としての反応 (3)

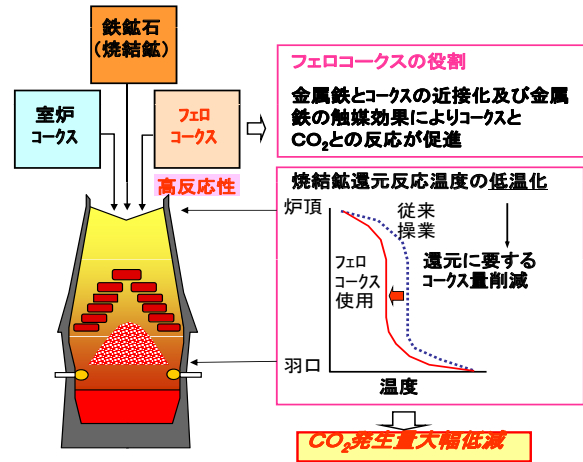
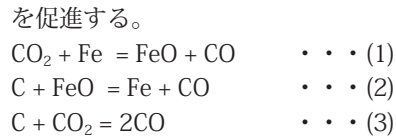


図 4 フェロコックスによる還元材比低減機構

図 5 に本プロジェクトの主要技術開発課題を示した。フェロコックスの製造技術開発とフェロコックスによる高炉操業プロセス開発に大別される。前者では、鉄石と石炭を結びつける新規バインダーの開発を (株) 神戸製鋼所が、成型技術、乾留技術開発を JFE スチール (株) が担当した。新規バインダーの強度発現機構の解明、乾留炉の粒子流動シミュレーションなどの基礎研究は東北大学に委託された。後者では、高炉内のフェロコックスの配置の最適化、高炉数式モデルの構築と還元材比評価技術の開発を新日鐵住金 (株) が担当した。フェロコックスの反応速度の基礎的な測定を九州大学に、鉄石の還元速度向上に関する研究を大阪大学に委託した。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (平成 23 年度からは経済産業省) による「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」として、助成・補助を受けて開発が進められた。

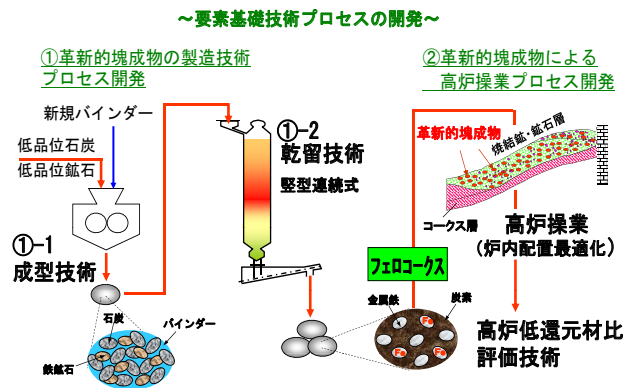


図 5 フェロコックスプロセス開発の開発課題

4. フェロコックス製造技術開発

フェロコックス製造のプロセスは図 6 に示したように①石炭の粉碎および鉄鉱石との混合・乾燥・加熱を行う原料設備、②バインダー (鉄鉱石と石炭を結び付ける

接合材)を添加後混練・成型を行う成型設備、③循環ガスによりガス加熱を行う乾留炉(堅型炉)、④ガス処理設備、⑤製品置き場、から構成されている。低品位の鉄鉱石と低品位の石炭を約3:7で混合、バインダーを添加、成型、乾留することにより金属鉄を内包するコークスを製造する。JFEスチール(株)東日本製鉄所(京浜地区)に生産能力30t/dのパイロットプラント(図7)を建設し、2011年4月から一部設備を稼働、製造技術の開発を進めてきた。

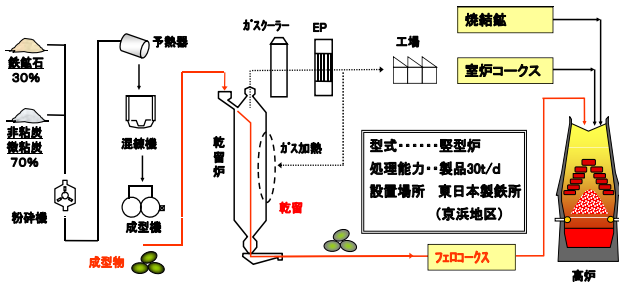


図6 フェロコークスパイロットプラント概要

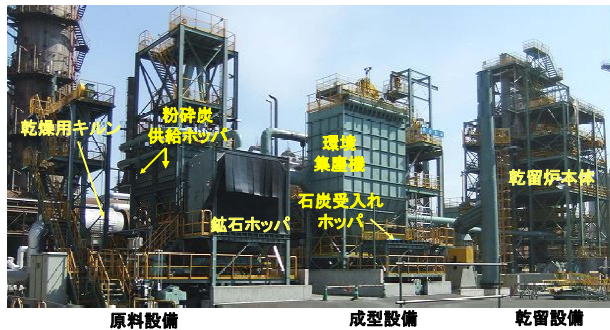


図7 パイロットプラント全景

開発の経緯は以下の通りである。

2011年4月

一部設備が稼働、試験開始

2011年度末～2012年4月

全工程の一貫操業試験

2012年4月～2013年2月

長期製造試験(7段階、約1ヶ月の連続操業を反復)

成型物の強度確保、堅型炉の温度制御など多くの課題を克服し、長期間(約1ヶ月)安定的に高品質のフェロコークスを製造する技術を実証した。

また、(株)神戸製鋼所は、石炭の溶媒抽出により新規バインダーを製造する技術を開発、約100kgのバインダーを試作した。試作バインダーを用いて、パイロットプラントでの成型、乾留試験を実施し、フェロコークスの強度向上の優位性を確認した。

5. 高炉使用技術開発

フェロコークスによる熱保存帯温度低下、還元材比削

減を目指して、高炉へのフェロコークスの装入方法の検討、効果の定量的な把握ができる数学モデルの開発を行った。新日鐵住金(株)はBIS炉を用いた試験を行い、フェロコークスの使用により約100℃の熱保存帯温度の低下を確認、また、その効果はフェロコークスを鉱石層に均一に装入した場合に最も大きい。さらに、層厚の絶対値の影響を明らかにするため実機の層厚330mmでの試験を行い、鉱石層への均一混合が反応率、焼結鉄の還元率の観点から望ましいことを明らかにした。また、フェロコークスの高炉での還元材比削減などの効果を評価する手段として、高炉数学モデルを開発した。鉱石、コークスのほかに、第3の固相としてフェロコークスを設定、炉内での反応、還元促進効果を定量的に評価した。また、フェロコークスの反応挙動を定量的に評価するため、九州大学が実施した実験室でのフェロコークスの反応速度測定に基づいて、ガス化反応モデルを構築した。

フェロコークスの高炉での挙動については、その還元材比低減効果、高炉への通気への影響など未解明の課題が多い。長期製造試験により製造、備蓄した約2,100tのフェロコークスを用いて、東日本製鉄所(千葉地区)第6高炉(炉容積5,153m³)にて2013年3月11日から5日間の使用試験を実施した。高炉でのコークス使用量の約10%をフェロコークスに置き換え、高炉操業に及ぼす影響を評価した。当初は高炉内のガス流通の悪化や溶鉄温度の変動が懸念されたが、フェロコークスの強度確保、高炉への装入方法の適正化により、高炉操業に悪影響を及ぼすことなく実験を終了することができた。同時に、多量使用時の通気性、炉頂温度影響など次ステップへの課題も明確になった。

6. 終わりに

本プロジェクト提案後、2011年3月に東日本大震災が発生、多くの原子力発電所が休止状態となり、国内のエネルギー長期戦略の見直しを余儀なくされている。また、2020年までに25%の炭酸ガス削減を目指す地球温暖化防止対策の見直しも必須な状況にあり、将来戦略の見通しが困難な状況ではあるが、パイロットプラント規模での技術確立に向けて当初の目標をすべて達成することができたことは関係者各位の努力の賜物である。今回の開発では、4年間の総事業費は、約37億円となっているが、今後実用化にむけては中型、大型の実証機での開発が想定され、引き続き産、官、学が一体となった開発と国からの開発支援を欠かすことができない。

最後に、本研究を遂行するに当たり、ご支援いただいた新エネルギー・産業技術総合開発機構、経済産業省関係者また、大変貴重なご指導、ご鞭撻をいただいた産、官、学界の研究者の皆様に、ここに記して感謝申し上げます。また、プロジェクトの推進、報告書のまとめに際してご尽力いただいた金属系材料研究開発センターに感謝いたします。

The Japan Research and Development Center for Metals

JRCM NEWS / 第323号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM総務企画部までお寄せください。本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2013年9月1日

発行人 小紫正樹

発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階

TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp