

第1回資源対応力強化のための
革新的製鉄プロセス技術開発
プロジェクト事後評価検討会
資料6

資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発

プロジェクト事後評価報告書

平成25年12月12日

経済産業省製造産業局鉄鋼課製鉄企画室

JFEスチール、新日鐵住金、神戸製鋼所

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	3
1-1 事業の目的.....	3
1-2 政策的位置付け.....	4
1-3 国の関与の必要性.....	5
2. 研究開発目標.....	7
2-1 研究開発目標.....	7
2-1-1 全体の目標設定.....	7
2-1-2 個別要素技術の目標設定.....	10
3. 成果、目標の達成度.....	13
3-1 成果.....	13
3-1-1 全体成果.....	13
3-1-2 個別要素技術成果.....	17
3-1-3 特許出願状況等.....	54
3-2 目標の達成度.....	59
4. 事業化、波及効果.....	64
4-1 事業化の見通し.....	64
4-2 波及効果.....	67
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	68
5-1 研究開発計画.....	68
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	69
5-3 資金配分.....	71
5-4 費用対効果.....	72
5-5 変化への対応.....	74

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業の目的

(1) 事業の科学的・技術的意義

平成 11 年度から平成 15 年度まで文部科学省科学技術振興調整費「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的精錬反応に関する研究」において反応平衡制御による超省エネ高炉操業原理と操業条件が提案された。この研究は、高炉の還元材比を支配する還元平衡を高炉原料により制御するという根本原理に立ち返った体系的な基礎的研究であり、高炉の省エネルギーと劣質原料の多量使用による資源対応力強化に寄与するものであった。

その後、平成 18 年度から平成 20 年度まで NEDO の「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」の先導研究において、金属鉄の触媒作用を利用して反応性を飛躍的に高めた革新的塊成物による革新的省エネルギー型高炉プロセスの先導的研究開発を手掛け、高炉内反応平衡温度を低下させる効果があり省エネルギー化が期待できることを確認した。また同時に革新的塊成物の原料には低品位原料の使用が可能であることから、高炉用原料として低品位原料の使用量拡大が可能であることも見出した。

これまでの研究成果を踏まえて鉄鋼業における資源対応力強化と革新的省エネルギー技術を確立することを目的として、以下の技術開発を平成 21～22 年度は NEDO において実施し、平成 23～24 年度は経済産業省直轄事業として実施した。

- 1) 革新的塊成物の組成・構造条件の探索
- 2) パイロットプラントによる革新的塊成物の製造プロセスの開発
- 3) 高炉シミュレーションモデルを用いた革新的塊成物による高炉操業プロセスの開発

研究成果は、2012 年度世界製鉄会議（ブラジル）などの国際会議で報告され、日本発信の新技术として、COURSE50 プロジェクトとともに高く評価されている。

(2) 社会的・経済的意義

我が国 CO2 排出量の約 15% を占め、我が国産業部門中最大の CO2 排出業種(産業部門全体の約 43%) である鉄鋼業においては、その CO2 排出の約 7 割を占める高炉プロセスでの還元反応効率を飛躍的に向上させ、省エネルギー・CO2 排出削減に有効な革新的製鉄プロセスの開発が必要である。

本事業が発足した 2009 年当時、世界的な資源メジャーによる企業の買収・合併の急進展による鉄鋼原料資源の寡占状態、さらに中国・インド等の発展途上国の鉄鋼生産急拡大の情勢で、我が国鉄鋼業は、①資源確保、②鉄鋼製品の国際競争力の両面で大きな課題に直面した。

具体的には比較的安定的に推移してきた石炭と鉄鉱石の鉄鋼原材料の価格は、2004 年以降に急激な上昇に転じ、2008 年には高品位炭が約 3 倍、鉄鉱石が約 1.7 倍とそれぞれ急騰した。

その後、2009 年の経済危機で価格が低下したものの、価格は反転、高止まり傾向となっており早急な対応が必要となっている。

現在も、天然資源が乏しい我が国鉄鋼業は、製鉄原材料（石炭と鉄鉱石）のほぼ全てを海外に依存する脆弱な立場にあり、資源対応力強化は我が国にとって喫緊の課題である。

また、「資源確保戦略」（平成 24 年 6 月 27 日 第 15 回パッケージ型インフラ海外展開関係大臣会合報告資料）において、産業の基礎素材として利用される鉄等のベースメタルが昨今、新興国

を含めた経済成長により需給が逼迫していることが指摘され、我が国製造業の競争力の源泉である素材を製造している鉄鋼業に必要な資源である鉄鉱石や原料炭の安定供給確保は必要不可欠であるとされている。また、資源の供給における不安定性を緩和する観点から、代替材料開発・使用量削減技術開発は極めて重要とされている。

本研究開発は以上のような社会的・経済的要請に応え、低品位の製鉄原料を活用した資源対応力の高い製鉄プロセスにより、製鉄プロセス（高炉法）における省エネルギーを促進するとともに、資源対応力の強化を実現しようとするものである。

具体的には、高炉内還元反応の高速化・低温化を可能にするフェロコックス（低品位石炭と低品位鉄鉱石を砕いて固め乾留したコークス代替還元剤）の開発及びフェロコックスを用いた革新的高炉操業技術の開発を実施するとともに、現行高炉操業に対して最大約10%の省エネルギー及び約20%の高品位炭使用量削減等を実現するものである。

1-2 政策的位置付け

（1）エネルギー基本計画（平成22年6月18日閣議決定）

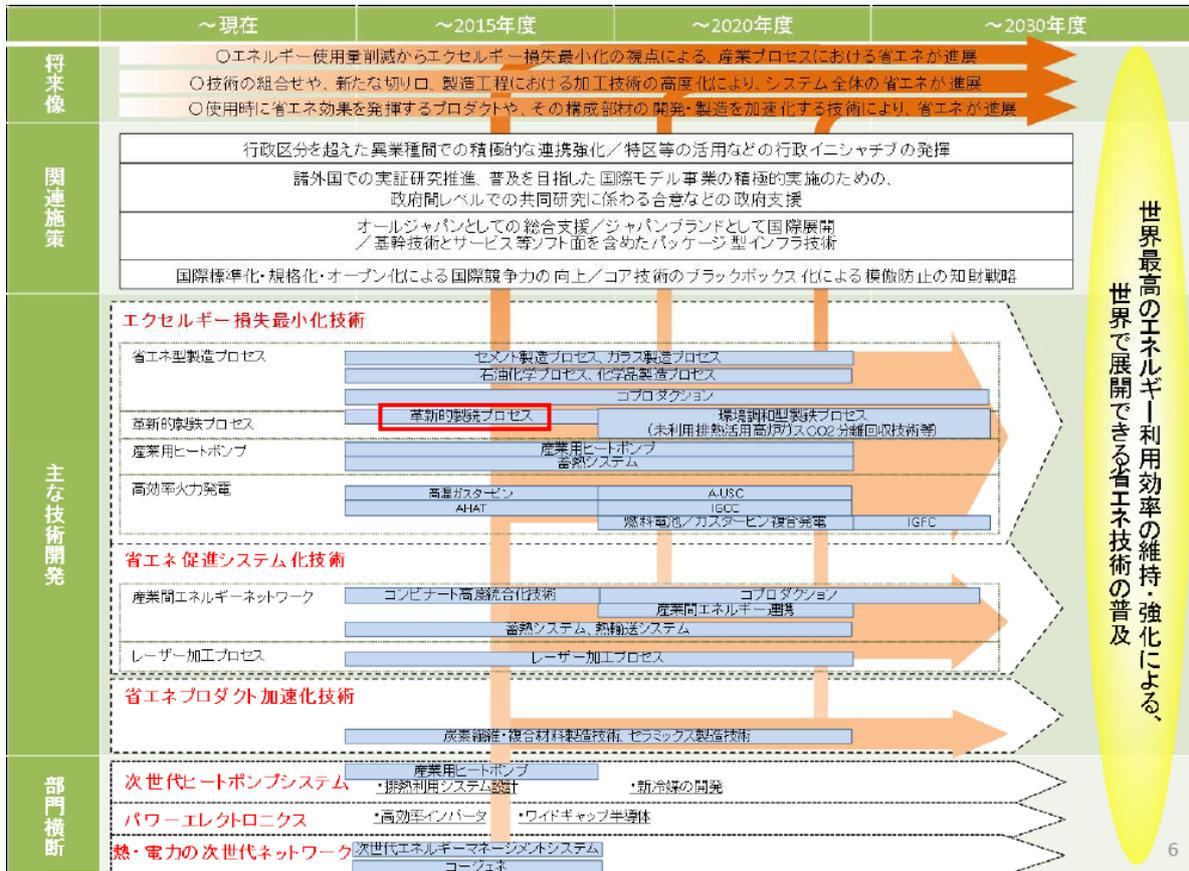
革新的製鉄プロセス（フェロコックス）の研究開発は、「エネルギー基本計画」（平成22年6月18日閣議決定）において、個別対策として、産業部門における世界最高の省エネ・低炭素技術の維持・強化策の具体的取組として位置付けられている。

（2）省エネルギー技術戦略2011（平成23年3月28日 資源エネルギー庁策定）

産業部門の重要技術の「技術開発の進め方」として、環境調和型製鉄プロセス（水素還元製鉄・高炉ガスCO₂分離回収）が2030年に実用化される技術であるのに対し、フェロコックスは2020年初頭に実用化が期待される技術である。

戦略策定の趣旨

- 「エネルギー基本計画」に掲げる2030 年に向けた目標の達成に資する省エネルギー技術開発と、それらの技術の着実な導入普及及び国際展開を推進し、世界最高水準の省エネルギー国家の実現と経済成長を目指すための指針。
- 広範・多岐に渡る省エネルギー技術は、重点化が必要であり、真に省エネルギーの推進に貢献する重要分野を特定。



省エネルギー技術戦略 2011(経済産業省資源エネルギー庁)

1-3 国の関与の必要性

(1) 省エネの取組の背景

エネルギー消費量全体の約5割を占める製造業の中で、鉄鋼業のエネルギー消費は約3割を占め、引き続き省エネ対策が必要となっている。

そのような中、日本の鉄鋼業は既に、世界最高レベルのエネルギー効率を達成し、既存技術による省エネ余地は少なく、個々の企業の取組では限界に達している。

(2) 資源対応力強化の取組の背景

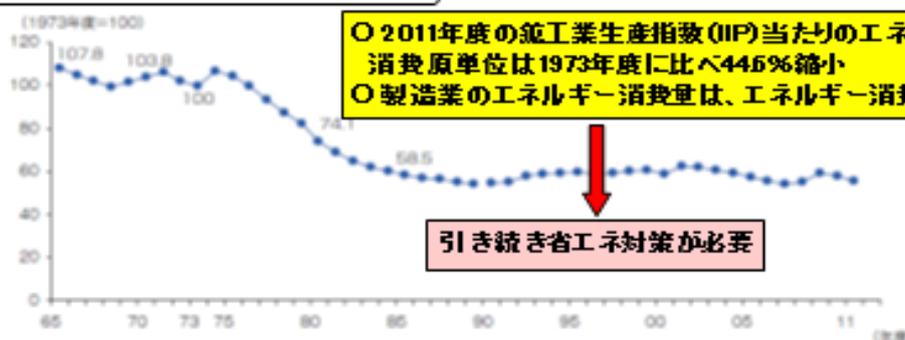
一方、鉄鋼原料である石炭、鉄鉱石の価格は石炭的に寡占状態にあるサプライヤーと大口ユーザーである中国の動向に大きく左右され、対応する新技術の開発、適用には個社の取組では限界がある。

(3) 国の関与の必要性

2020年以降、高度成長期に建設された多くのコークス炉の寿命は約50年を経過し本格的な更新時期を迎える中、上述の背景を踏まえ、製鉄プロセスにおける省エネルギー及び低品位原料利用拡大を両立させた革新的技術を開発し、喫緊の課題となっている我が国の鉄鋼業における省エネルギー化及び資源対応力強化の促進することが必要となっている。

そのためには、個社別による対応ではなくコンソーシアムでの取組に国が支援を行うことにより短期集中的に実施し、実用の早期化を図ることが必要である。

製造業のエネルギー消費原単位の推移



○ 2011年度の鉱工業生産指数 (IPI) 当たりのエネルギー消費原単位は1973年度に比べ44.6%縮小
 ○ 製造業のエネルギー消費量は、エネルギー消費全体の約5割

引き続き省エネ対策が必要

出典: (一財)日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧」

製造業業種別エネルギー消費の推移



○ 鉄鋼、化学、窯業土石(セメント)及び紙パルプの素材系産業はエネルギーを比較的多く消費
 ⇒ エネルギー消費の7割以上

○ 鉄鋼業のエネルギー消費は、3割を占める。

出典: 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

(1) フェロコークスプロセスの原理と製品の特徴

フェロコークスとは、高炉内で起こっている鉄鉱石還元反応の効率自体を改善し二酸化炭素の発生量を大幅に削減する革新的な高炉原料である。

石炭と鉄鉱石を事前に粉砕・混合・成型し、連続式縦型の乾留炉で加熱することでフェロコークス製品となる。フェロコークスに使用する原料として、従来に比べ品位の低い石炭（非粘結炭、微粘結炭）や低品位鉄鉱石の使用割合を大幅に増加できる。

本プロセスは、以下より構成されている。（図 2-1）

- ①石炭の粉砕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（アスファルトピッチ・ソフトオイルピッチ）を添加後混練・成型を行う成型設備
- ③循環ガスを精製するガス処理設備とそれを熱源としガス加熱を行う乾留炉（縦型炉）
- ④製品置場

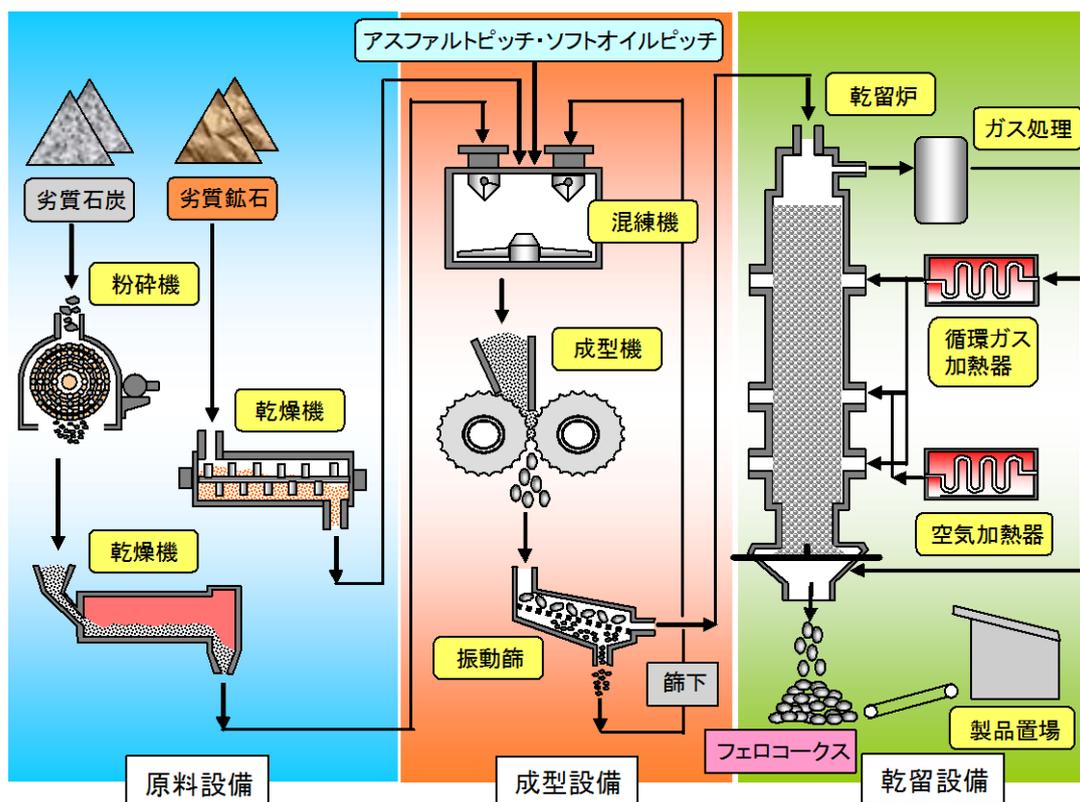


図 2-1 フェロコークス製造プロセスフロー

製造されたフェロコークスは、石炭に由来するコークス内に鉄鉱石に由来する超微粒の金属鉄（ 50μ 以下）が分散した複合塊成物で、反応性が格段に向上することに特長がある。（図 2-2）

高炉では、通常のコークスの一部をフェロコー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（焼結鉄）の還元反応の進行により、二酸化炭素（ CO_2 ）

が発生しており、フェロコークス内部に含まれている超微粒の金属鉄は、この CO_2 がコークス (C) と反応し還元ガス (CO) を再生成する反応 ($\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$: ソリュションロス反応) の触媒となり、低温域まで反応が進行する。実際にラボスケールでガス化挙動を調査 (ガス分析に基づく入出のカーボン収支からガス化量を算出) した結果、石炭のみを使用して乾留したのものに対し、ガス化開始温度は 120°C 低下した。さらに、このガス化開始温度が高炉操業に及ぼす影響を高炉二次元モデルより推定した結果、シャフト部の温度が低温化する一方で融着帯下端に相当する 1400°C の等温線は上方に移動した。(図 2-3) コークスのガス化開始温度の低温化に伴いソリュションロス反応は増加するが、鉱石の還元も低温から進行し、融着帯下端での鉱石の還元率が上昇するため FeO との直接還元反応は減少する。結果として間接還元率が上昇し、融着帯下端位置の上昇が得られた。

フェロコークスを使用した高炉操業において、熱保存帯温度の低下を介した還元材比低減が期待でき、 CO_2 排出削減、省エネルギーに貢献できる。

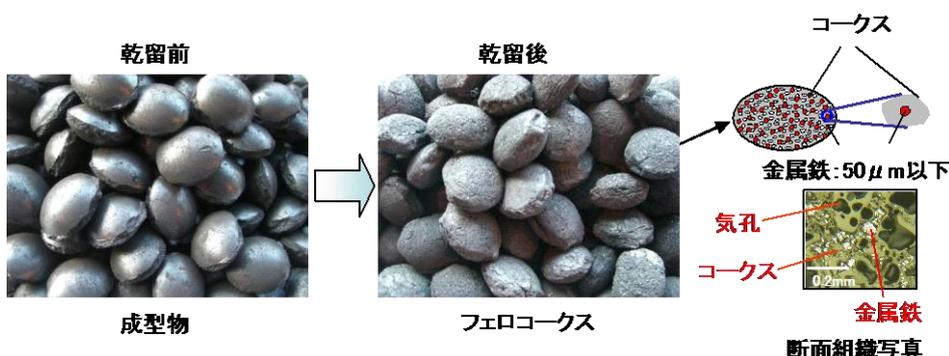


図 2-2 パイロットプラントで製造されたフェロコークス

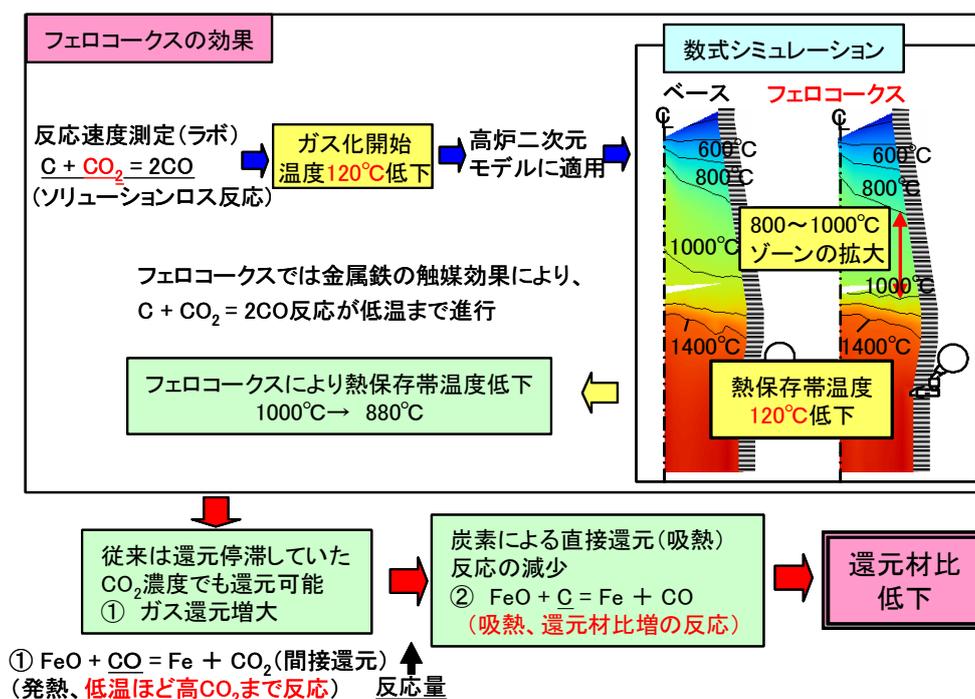


図 2-3 フェロコークス使用による還元材比低減

(2) 開発目標の設定

本研究開発は、石炭と鉄鉱石によるフェロコークスによって製鉄技術に革新をもたらすもので、30トン/日の規模でその製造プロセスの実現性を実証して、根本的にこれまでの鉄鉱石と石炭の利用方法を革新して、我が国の資源対応力を飛躍的に向上させる技術である。これにより、新興国技術では対応できない劣質石炭と劣質鉄鉱石の利用を拡大できる。

本研究開発では、製鉄プロセスにおいて低品位原料の使用比率を高める資源対応力を強化すると共に、熱保存帯温度を低下させることにより高炉還元材比を低減し、省エネルギー化を図る。具体的には現行高炉操業に対して、最大約10%の省エネルギー及び約20%の高品位炭の使用量削減等を実現する。目標を実現させるためには、高炉で使用可能な強度と反応効率向上効果を有するフェロコークスを製造・使用する技術の開発が必要である。そのため、製造条件、プロセス開発、高炉操業の3項目を開発重点項目とし、各々について以下の目標を設定した。

表 2-1 全体の目標設定

研究開発項目	目標・指標	設定理由
①フェロコークスの組成・構造条件の探索	成型設備を完成し、設備の操業技術を確立する。	成型・乾留一貫操業技術の確立に向けて、前段工程である成型設備の操業技術を確立するため。
	新規バインダーを数種試作し、新規バインダーの性状、配合量と成型物強度の関係を明確にする。	フェロコークスに適した新規バインダーの工業的生産技術の確立に活用するため。
②フェロコークスの製造プロセス開発	循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉での適正製造条件を確立する。	パイロット規模での製造技術、安定操業技術を確立し、次ステップへのスケールアップ検討が可能な技術を構築するため。
	長期製造試験により、安定製造技術を確立する。	
	フェロコークスの品質評価試験により、大型高炉での使用時の課題を明確化する。	大型高炉使用試験に向けた製造技術、使用技術を検討するため。
	離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討、原料配合設計に適用できるシミュレーションを実施する。	次ステップのスケールアップの指針を得るため。
③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発	混合分散状態制御因子の影響を明確化する。	フェロコークスの高炉装入、評価技術を構築、次ステップのスケールアップ検討時の効果推算精度向上技術を構築するため。
	生成融液の存在が高温還元性状に及ぼす影響を明確化する。	
	フェロコークスの反応モデルの検証と精度向上を達成する。	
	フェロコークスの反応モデルを高炉数学モデルへ導入した総合モデルを構築する。	

2-1-2 個別要素技術目標設定

①フェロコークスの組成・構造条件の探索

①の開発目的を達成するために、①-1として「実験室規模小型成型試験での試作と成型物の物性評価」、①-2として「成型設備（30t/d）の開発」をJFEスチールが開発し、①-3として「成型物強度向上のためのバインダー探索」を神戸製鋼所と委託先の東北大学大学院工学研究科が開発した。各々について以下の目標を設定した。

表 2-2 ①フェロコークスの組成・構造条件の探索の個別目標設定

研究開発項目	目標・指標	設定理由
①フェロコークスの組成・構造条件の探索		
①-1 実験室規模小型成型試験での試作とフェロコークスの物性評価	小型成型試験機を用い適正成型条件を確立する。	成型歩留りと成型後強度を確保できる均一攪拌技術を確立し、フェロコークスが目標とする強度と反応性を有することを確認するため。
①-2 成型設備（30t/d）の開発	成型設備を完成し設備の操業技術を確立する。	成型、乾留一貫操業技術の確立に向けた成型設備の操業技術を確立するため。
①-3 フェロコークス強度向上のためのバインダー探索	新規バインダーを数種類試作し、新規バインダーの性状・配合量とフェロコークス強度の関係を明確にする。	ベンチスケールで製造した新規バインダーのベンチ成型試験を実施し、ASP代替の可能性を見出すため。

②フェロコークスの製造プロセスの開発

②の開発目的を達成するために、②-1として「実験室規模での適正乾留条件探索」、②-2として「30t/d 規模パイロット型乾留炉の設計」、②-3として「30t/d 規模パイロット型乾留炉の建設と実証」、②-4として「長期製造試験と品質評価」をJFEスチールが開発し、②-5として「型乾留炉の流動シミュレーション」を東北大学多元物質科学研究所が委託により開発した。各々について以下の目標を設定した。

表 2-3 ②フェロコークスの製造プロセスの開発の個別目標設定

研究開発項目	目標・指標	設定理由
②フェロコークスの製造プロセスの開発		
②-1 実験室規模での適正乾留条件探索	実験室規模の電気抵抗加熱乾留炉を用いた実験結果より、適正操業条件を決定する。	実験室規模炉での炉内温度勾配を変更した実験に基づき、強度、反応性の観点から最適操業条件を決定するため。

研究開発項目	目標・指標	設定理由
②-2 30t/d 規模パイロット型乾留炉の設計	②-1 の研究成果を基に直接加熱方式による連続型乾留炉の設計を完了する。	複数羽口へのガス温度・流量などの制御技術を基本とする循環ガス加熱システム、金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムを構築・反映させるため。
②-3 30t/d 規模パイロット型乾留炉の建設と実証	循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉での適正製造条件を確立する。	成型、乾留一貫システムの運転、操業技術を確立するとともに、30t/d の製造能力を実証するため。
②-4 長期製造試験と品質評価	長期製造試験により、安定製造技術を確立する。	原料性状などの操業変動に対応する技術を構築し、スケールアップのためのエンジニアリングデータを取得するため。
	フェロコークスの品質評価試験により、大型高炉での使用時の課題を明確化する。	炉頂部のガス利用率変化など、操業要因を測定し、高炉使用時の課題を検討、明確化するため。
②-5 型乾留炉の流動シミュレーション	離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討、原料配合設計に適用できるシミュレーションを実施する。	滞留時間分布の観点から炉の形状の最適化を図る共に、スケールアップの指針を得るため。

③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発

③の開発目的を達成するために、③-1-1 として「高炉内反応平衡制御手段の提示」を新日鐵住金が開発し、③-1-2 として「高炉内反応平衡制御のための操業条件の適正化」を大阪大学大学院工学研究科が委託により開発した。③-1-3 として「フェロコークスの反応モデル構築」を九州大学大学院工学研究院が委託により開発し、③-1-4 として「フェロコークスの高炉数学モデル構築」、③-1-5 として「高炉数学モデルによるフェロコークスの最適配置条件の提示」、③-2 として「高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化」を新日鐵住金が開発した。各々について以下の目標を設定した。

表2-4 フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発の個別目標設定

研究開発項目	目標・指標	設定理由
③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発		
③-1-1 高炉内反応平衡制御手段の提示	フェロコークスの高炉操業状況への効果が発揮されるメカニズムと効果が最大となる条件を提示する。	フェロコークスの高炉装入、評価技術を構築するため。

研究開発項目	目標・指標	設定理由
	フェロコークスによる熱保存帯温度低下などの効果を定量化する。	スケールアップ検討時の効果推算精度向上技術を構築するため。
③-1-2 高炉内反応平衡制御のための操業条件の適正化	フェロコークスの構造として最適な気孔構造など具備すべき条件を提示する。	高炉高温域におけるフェロコークスの被還元性及び及ぼす融液生成挙動の影響と貫通孔の効果に関する基礎データとするため。
③-1-3 フェロコークスの反応モデル構築	高炉数学モデルに適用する反応モデルを構築する。	種々のフェロコークスのガス化反応速度を測定・解析した結果に基づき、高炉数学モデルに適用可能な反応モデルを構築するため。
③-1-4 フェロコークスの高炉数学モデル構築	フェロコークスの配置・配合率の評価機能を有する高炉数学モデルを構築する。	上記反応モデルを統合し、フェロコークスの配置・配合率の評価機能を有する数学モデルを構築するため。
③-1-5 高炉数学モデルによる実用フェロコークスの最適配置条件の提示	フェロコークスの最適配置・最適配合率を導出する。	上記高炉数学モデルを使用し、フェロコークの配置・配合率が還元材比に及ぼす影響を調査し、最適値を導出するため。
③-2 高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化	フェロコークスの装入技術および高炉内評価技術を開発し、高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化を図る。	フェロコークスの粒子径の排出挙動、炉内堆積挙動の影響を検証するため。
	制御性と再現性に優れた最適な装入方法を提示する。	粒子径の異なるフェロコークスの炉内堆積挙動のDEM解析を実施するため。

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

本プロジェクトは、平成21～24年度にかけ参画企業4社で各研究開発項目を実施された。プロジェクト開始から2年間は新エネルギー・産業技術総合開発機構の助成事業として、また、平成23、24年度の2年間は経済産業省からの補助事業として実施している。さらに基礎的な研究は関連する大学に委託されて個別に推進された。

表3-1 本プロジェクトのスケジュール

研究開発項目	平成21年度				平成22年度				平成23年度				平成24年度			
	1/四	2/四	3/四	4/四	1/四	2/四	3/四	4/四	1/四	2/四	3/四	4/四	1/四	2/四	3/四	4/四
①フェロコークスの組成・構造の探索	均一混合技術開発															
	成型設備設計・製作着手				据付完了・試運転				成型設備操業技術開発							
	バインダー最適特性調査				強度向上条件				フェロコークス試作・評価				100kgレベルの製造・評価			
	フェロコークス特性把握				強度改善機構の解明				強度改善機構の解明				数値解析による製造条件			
②フェロコークスの製造プロセス開発	最適操業条件の決定															
	連続乾留設備の設計															
	炉本体の製作着手				据付完了・耐火物乾燥				パイロット製造実証着手				製造能力の実証 製造条件の確立			
	モデル設計・冷間実験				炉壁効果・応力荷重の影響				モデル精度向上				長期製造試験 高炉使用試験 スケールアップ検討 シミュレーション			
③フェロコークスによる高炉操業プロセス開発	還元溶融基礎特性				混合・分散状態影響				混合・分散状態影響				最適混合条件			
	貫通孔の還元改善効果				生成融液の影響				生成融液の影響				焼結鉱の物性条件			
	反応モデル設計				反応実験・モデル構築				反応実験・反応解析				反応モデル構築・解析			
	高炉数学モデル設計				高炉数学モデル構築				高炉数学モデル構築							
									感度解析				最適配置・配合率の導出			
								実験解析手法の検討				最適装入方法提示				

各研究開発項目に対し、以下のような具体的な最終目標を設定し、表3-2のような成果が得られた。

①フェロコークスの組成・構造条件の探索

- ・成型設備を完成し、設備の操業技術を確立する。
- ・新規バインダーを数種試作し、新規バインダーの性状、配合量と成型物強度の関係を明確にする。

②フェロコークスの製造プロセスの開発

- ・循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉での適正製造条件を確立する。

- ・長期製造試験により、安定製造技術を確立する。
 - ・フェロコークスの品質評価試験により、大型高炉での使用時の課題を明確にする。
 - ・離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討、原料配合設計に適用できるシミュレーションを実施する。
- ③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発
- ・混合・分散状態制御因子の影響を定量化する。
 - ・生成融液の存在が高温還元性状に及ぼす影響の明確化。
 - ・フェロコークスの反応モデルの検証と精度向上を達成する。
 - ・フェロコークスの反応モデルを高炉数学モデルへ導入した統合モデルを構築する。

表 3-2 全体成果

研究開発項目	最終目標	研究成果
①フェロコークスの組成・構造条件の探索	成型設備を完成し、設備の操業技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・攪拌混合時の速度、温度、時間等の影響因子を調査し、成型歩留りと成型後強度を確保できる均一攪拌技術を確立した。 ・フェロコークス同士の融着の有無を確認するとともにI型強度試験機、荷重軟化試験装置を用いてフェロコークスが目標とする強度と反応性を有することを確認した。 ・成型、乾留一貫操業技術の確立に向けた成型設備の操業技術を確立した。
	新規バインダーを数種試作し、新規バインダーの性状、配合量と成型物強度の関係を明確にする。	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭を高温溶剤抽出して得られる新規バインダーについて、流動特性の異なる2種類のバインダーを試作し、その性能を評価するとともに、物理・化学的特性を解明した。 ・従来バインダーより低軟化点の新規バインダーがフェロコークスの強度向上に顕著な効果のあることを見出し、従来バインダー代替2%添加試験をパイロットプラントにより実施し、新規バインダーの優位性を確認した。 ・新規バインダーを用いたフェロコークスについて、配合、コークスの微細構造、欠陥生成、および強度の関係を詳細に調査して強度の支配因子を明らかにするとともに、新規バインダーによる強度向上指針を提示した。

研究開発項目	最終目標	研究成果
②フェロコークスの製造プロセスの開発	循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉での適正製造条件を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実験室規模炉での炉内温度勾配を変更した実験に基づき、強度、反応性の観点から最適操業条件を決定した。 ・ 複数羽口へのガス温度・流量などの制御技術を基本とする循環ガス加熱システムを構築した。 ・ 排ガスからのタール除去、排ガス/循環ガスからのコーキング抑制方法を開発した。 ・ 金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムを構築した。 ・ 循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉の設計を実施した。 ・ 成型、乾留一貫システムの運転、操業技術を確立するとともに、30t/dの製造能力を実証した。 ・ 品質向上を目指すため炉頂、各羽口の循環ガス量、温度などの最適操業条件を確立した。
	長期製造試験により、安定製造技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原料の水分、粒度などの操業変動に対応する技術を構築し、長期連続操業を実施した。 ・ 設備の一部の解体調査（混練機の攪拌羽根、成型機のロール、乾留炉耐火物、製品排出装置など）を実施し、設備劣化を定量的に評価した。
	フェロコークスの品質評価試験により、大型高炉での使用時の課題を明確にする。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉頂部のガス利用率変化など、操業要因を測定し、高炉使用時の課題を検討、明確化した。
	離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討、原料配合設計に適用できるシミュレーションを実施する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 滞留時間分布の観点から炉形状の最適化を図る共に、スケールアップの指針を得た。 ・ 排出口形状などの炉体構造影響を検討、粒子収縮など、物性性状の変化の影響を検討した。
③フェロコークスによる高炉操業プロセス開発	混合・分散状態制御因子の影響を定量化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ フェロコークスをコークス層に混合するよりも鉍石層に混合した場合のほうが熱保存帯温度低減効果が高い。 ・ フェロコークスのガス化反応量と焼結鉍還元促進効果の観点から、フェロコークスは鉍石層に均一混合することが望ましい。

研究開発項目	最終目標	研究成果
③フェロコークスによる高炉作業プロセス開発		<ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークスを鉱石層に 158kg/t 相当を均一混合した場合、約 100℃程度の熱保存帯温度低減効果と、12.6kg/t の還元材比低減効果を確認した。さらに、焼結鉱の被還元性向上や、フェロコークス粒度制御によって更なる効果の向上も期待できる。 ・フェロコークスの粒子径の排出挙動、炉内堆積挙動の影響は大きいですが、粒子径比が 0.8 の条件では、半径方向の混合比が均一に近づく。 ・粒子径の異なるフェロコークスの炉内堆積挙動の DEM 解析の結果、フェロコークスを炉内に混合配置するためには、粒子径を焼結鉱に対して 0.9 倍程度とすることが望ましい。 ・高炉数学モデルを使用し、フェロコークの配置・配合率が還元材比に及ぼす影響を調査し、最適値を導出した。
	生成融液の存在が高温還元性状に及ぼす影響を明確化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・高炉高温域における塊成鉱の被還元性に及ぼす融液生成挙動の影響と貫通孔の効果に関する基礎データを提示した。貫通孔は、軟化融着帯温度域においても被還元性向上に効果的である。 ・通常の還元条件では、MgO 添加により初期融液の FeO 粒子上への薄膜形成と難還元性中間化合物生成の影響で還元速度が低下した。 ・熱保存帯低温化では、還元形態が変化して被還元性の向上に繋がった。
	フェロコークスの反応モデルの検証と精度向上を達成する。	種々のフェロコークスのガス化反応速度を測定・解析した結果に基づき、高炉数学モデルに適用可能な反応モデルを構築した
	フェロコークスの反応モデルを高炉数学モデルへ導入した統合モデルを構築する。	上記高炉数学モデルを使用し、フェロコークの配置・配合率が還元材比に及ぼす影響を調査し、最適値を導出した。

3-1-2 個別要素技術成果

①フェロコークスの組成・構造条件の探索

①-1 実験室規模小型成型試験での試作とフェロコークスの物性評価

(1) 成型歩留りと成型後強度を確保できる均一攪拌混合技術の確立

成型歩留りと成型後強度を確保できる均一攪拌混合技術を確立するために、実験室規模の攪拌機・成型機を用い石炭・鉱石を攪拌混合時の速度、温度、時間等の影響因子を調査した。攪拌機は内容積 75L の高速攪拌機を使用し、成型機はφ650mm-W100mm の高圧成型機を使用した。(図 3-1 参照) 成型試験では、表 3-3 に示した 2 種類の石炭を使用し、鉱石には表 3-4 に示した鉄分の高い良質なヘマタイト鉱石を使用した。また、バインダーとして軟ピッチ (以下 SOP) およびアスファルトピッチ (以下 ASP) を原料内数で 5mass% 使用した。化鉱石 A の粒径は、全量 0.1mm 以下であった。石炭 A および B は 2mm 以下に粉碎し、所定量配合した混合原料を 6cc (30×25×15mm) の卵型に成型した。(図 3-1 参照) 図 3-2 に成型試験装置の概略図、詳細成型条件を表 3-5 に示す。



図 3-1 攪拌機・成型機および成型物 (約 6cc)

表 3-3 石炭の性状

炭種	R _o (%)	VM (%)	MF (ddpm)	TI (%)
石炭 A	1.30	21.3	3	41.8
石炭 B	1.65	15.4	0	100

表 3-4 鉱石の化学組成 (mass%)

	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	P
鉱石 A	65.8	0.14	0.47	0.49	0.32	0.04	0.02	0.05	0.004	0.033

均一混合状態であるか否かは、成型後の見かけ密度を測定し、その標準偏差を評価した。原料の分散性は攪拌速度を上げることで向上するが、成型物の見かけ密度は成型圧に依存し、成型圧がある一定以上でばらつきも低下することを確認した。(図 3-3 参照)

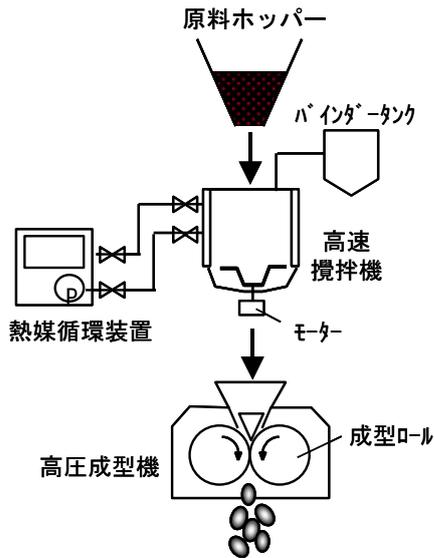


図 3-2 成型試験装置の概略図

表 3-5 成型条件

成型圧	3~5t/cm
ロール径	650mm
ロール回転数	6rpm
原料排出温度	160~170°C
カップ容量	6cc (30 x 25 x 15mm)
成型原料 (mass%)	石炭/鉱石 = 7/3
バインダー (mass%)	SOP/ASP = 3/2
原料粒径	石炭 ; -2mm, 鉱石 ; -0.1mm
原料投入量	約 20kg-dry

石炭 A/石炭 B=4/6 (mass%)

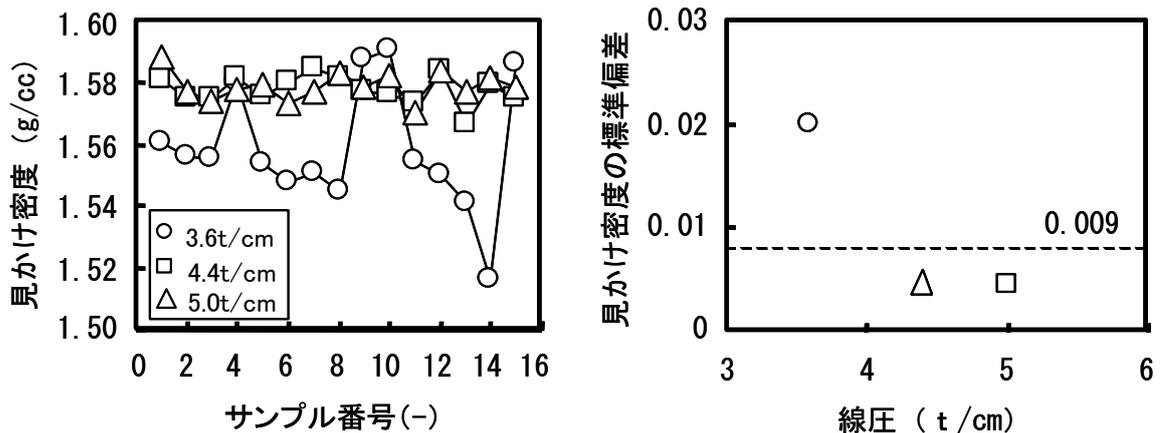


図 3-3 成型物の見かけ密度・標準偏差

(2) ラボスケールでの成型物・フェロコークスの強度と反応性

縦型乾留炉での乾留を想定し、加圧状態での乾留試験を実施した。乾留後、フェロコークス同士の融着の有無を調査し、また、乾留後の強度を評価した。成型用原料として、石炭と鉄鉱石の配合比率は重量比で7対3、石炭中の微粘結炭と非粘結炭の配合比率は重量比で1対1とした。成型圧は乾留前強度に影響を及ぼし、成型圧の上昇とともに強度は向上するが、一定圧力以上になると反発割れが発生する。適正成型圧で成型された成型物は加圧状態での乾留において成型物同士の融着は認められず、乾留後のフェロコークス強度は目標強度 (DI150/6) 82 をクリアした。また、乾留前強度と乾留後強度には相関があり、成型条件 (均一攪拌、成型圧) が乾留後強度に与える影響は大きいことが判明した。

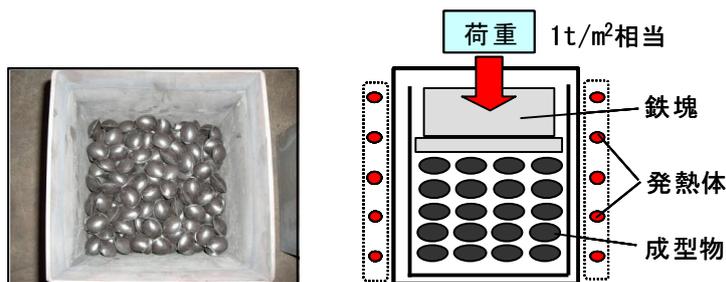


図 3-4 充填層を考慮したバッチ式加圧乾留試験

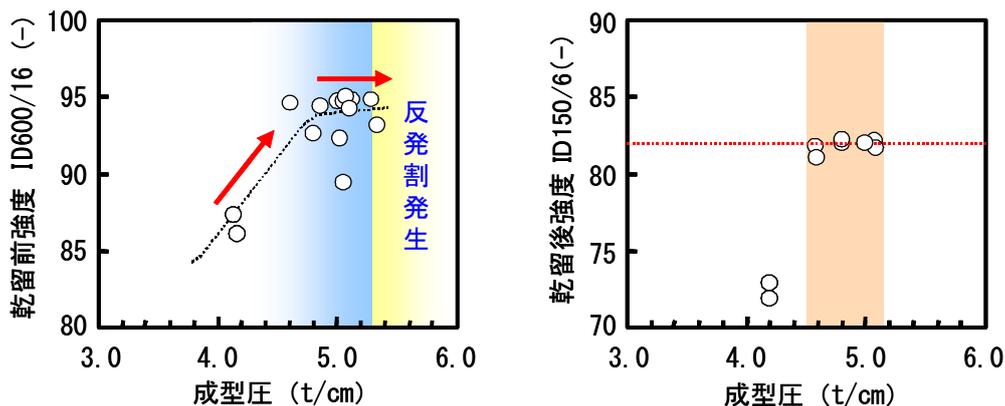


図 3-5 成型圧と乾留前後の強度

①-2 成型設備 (30t/d) の開発

(1) 原料供給設備の検討

図 3-6 に原料供給設備フローを示す。原料供給設備は、非粘結炭および微粘結炭を所定の粒度に粉砕するための石炭粉砕機を有するが、鉍石に関しては提案段階との予算の差異から粉砕機を持ち合わせてない。そのため供給する鉍石は先導的研究の供試材と使用した微粉のペレットフィードを使用した。

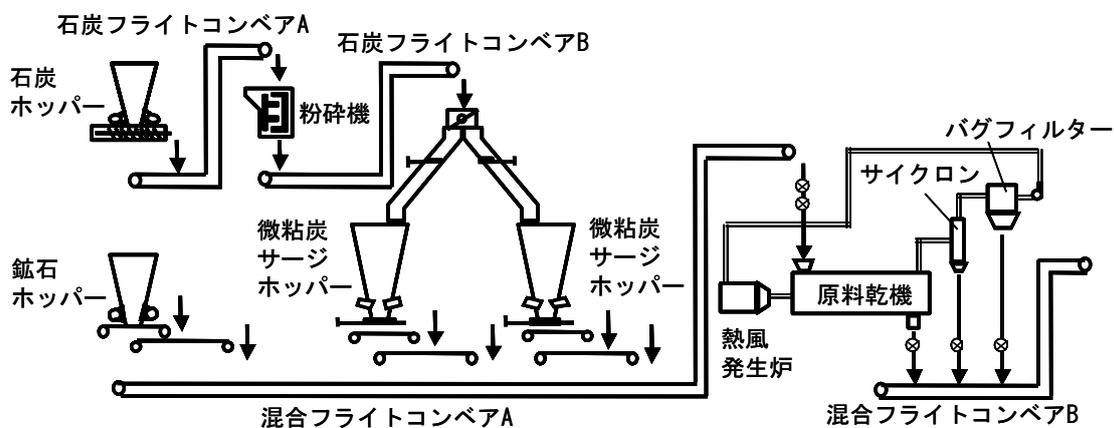


図 3-6 原料供給設備フロー図

(2) 石炭粉砕粒度とハンドリング強度

パイロットプラントでは、石炭粉砕に図 3-7 に示すようなケージミルを使用し、目標粒度 -2mm98%を達成するためにケージの回転数と粉砕粒度の関係を検討した。図 3-8 に非粘炭の粉砕検討結果を示す。原料供給設備完成当初、石炭ホッパー下部のスクリュウフィダー減速比が不適切であったため、所定量以上の石炭が粉砕機に供給され、目標粒度を達成することができなかったが、減速比の適正化によりケージの回転数と粉砕粒度に相関が確認された。石炭の水分量が 8% 前後では、非粘結炭は 600~700rpm、微粘結炭は 800~900rpm で目標粒度に粉砕することが可能であった。

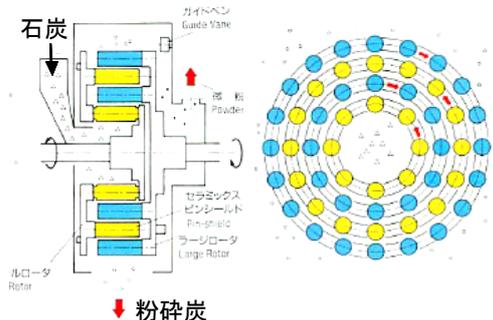


図 3-7 石炭粉砕機概略図

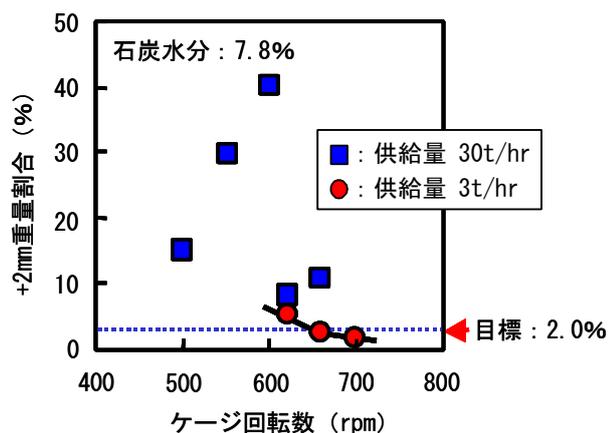


図 3-8 ケージ回転数と粉砕粒度

(3) バインダー添加量とフェロコークス強度

次にバインダー添加量について検討した。石炭系軟ピッチ量=1.5X 石油系ピッチ量とした。図 3-9 にバインダー添加率と製品歩留、半割れ率の関係について調査した。製品歩留=全量-半割れ率-粉率である。バインダー添加率上昇に伴い、半分に割れた成型物の発生が増加し製品歩留が低下した。I 型強度もバインダー上昇に伴い高強度化が顕著にならず、8%では表面亀裂により強度低下を招くことがわかった。また、バインダー添加率を 4%とすると I 型強度が 70 程度まで低下することからバインダー添加率を 5%とした。

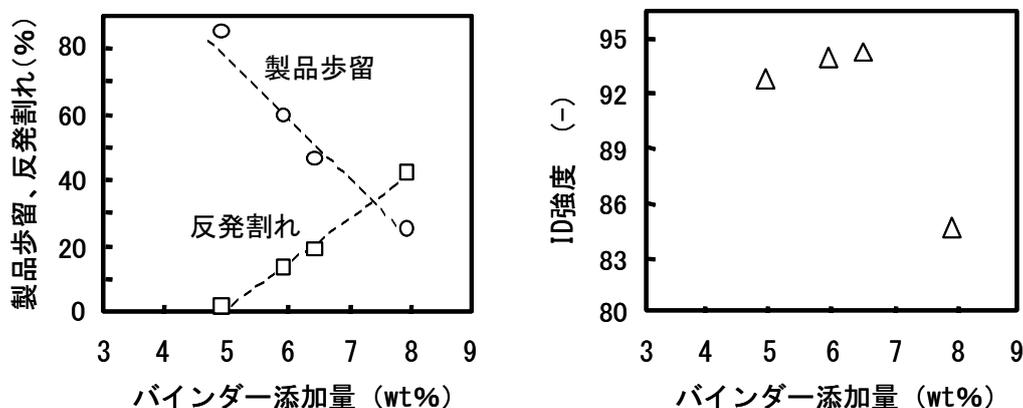


図 3-9 成型物品質に及ぼすバインダー添加率の影響

(4) 連続成型設備の設計・建設

①-1の実験室規模小型成型試験での研究成果を工業的規模での連続成型設備の設計仕様に反映させた。図3-10にパイロットプラント成型設備の立面図を示す。高さは約18m、最上階の5Fには前工程の原料・乾燥設備から送り込まれる成型原料を搬送する垂直コンベアのヘッド部およびバインダーの一つであるASPを供給するためのASPホッパーが設置されている。垂直コンベアで搬送された成型用原料は、4Fに配置されたサージホッパーに貯留される。貯留された原料は、3Fの混練機に所定量投入され、これに液体バインダーであるSOP添加し均一に攪拌される。均一混合された成型原料は、3Fフロアーレベルの混練機排出ホッパーに一旦貯留され、スクリーフイーダーで2Fの成型機本体へ供給され、ダブルロールで成型物に成型される。

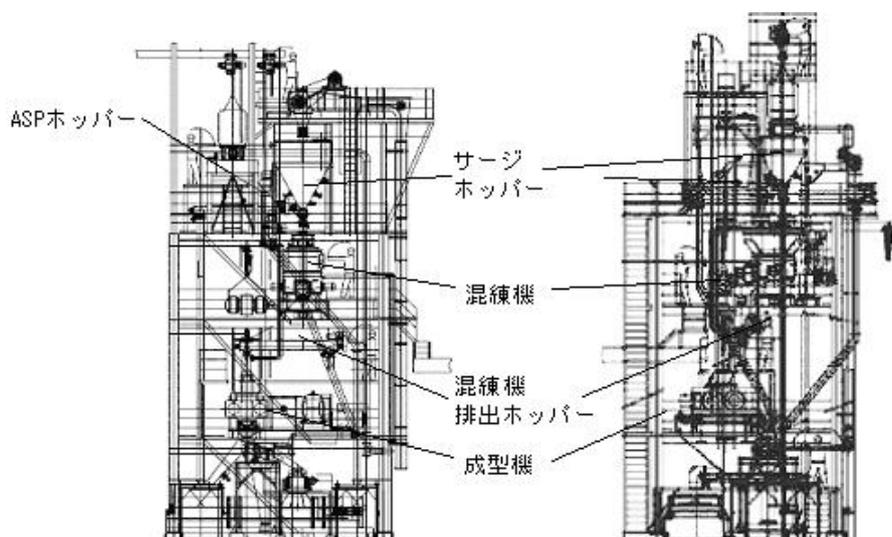


図3-10 成型設備立面図

実験室規模での混練、成型条件およびバインダー添加条件をパイロットに適用し成型試験を実施した。1バッチ280kgの鉱石・石炭混合物を有効容積375Lの混練機に投入し、SOPとASPを添加後、混練実施。成型機(3.75t/h)へ原料を流し込み、図3-11のような成型物を製造した。成型物の圧潰強度および見かけ密度を表3-6に示す。見かけ密度(目標1.54-1.57g/cc)、圧潰強度(目標28kg/個)とも目標値をクリアし、混練成型のスケールアップに問題なく対応できた。



図3-11 パイロットで製造した成型物の外観写真

表 3-6 成型物の性状

圧潰強度 (kg/個)	見かけ密度 (g/cc)
35.0	1.54

鉬石、微粘結炭、非粘結炭をそれぞれ 30wt%、28wt%、42wt%の割合で合計 1.85dry-t/h で切り出し、原料加熱機で 180℃程度に加熱した。加熱後の原料はサージホッパーに搬送後、混練機に 200kg 切り出して混練した。混練機攪拌羽根の回転速度は 180rpm で、バインダーである ASP は 2wt%、SOP は 4.0wt%、混練時に添加した。混練後、原料を成型機へ投入し、成型した。成型ロールの回転速度は 3rpm で、成型圧力が 80~120t となるよう成型機ロール上に設置されている原料投入量調整板の高さを変えて調整した。

上記の条件で約 5 時間連続成型し、1 時間毎に成型物をサンプリングし、I 型強度 (ID30/16) を測定した。連続成型試験での混練機内の原料温度の推移を図 3-12 に示す。混練温度の推移で、温度が下がっている箇所はバッチ混練が終了して混練機から原料が排出され、新しい原料が投入されたことを表しており、混練温度も目標温度に達し、安定して混練、成型されたことがわかった。一定時間ごとにサンプリングした成型物の強度測定結果を図 3-13 に示す。これより、全て目標強度 88 を達成していることが確認された。

本条件のもと、連続成型試験を数回実施し、乾留炉試運転用成型物を約 100t 製造した。

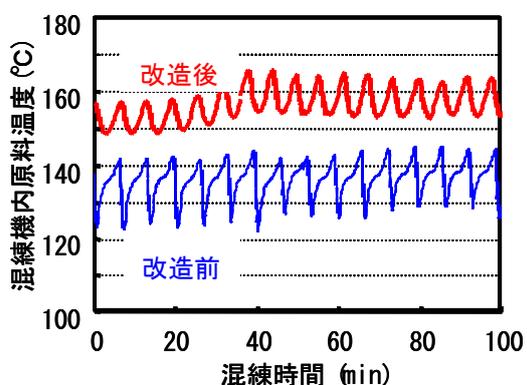


図 3-12 混練機内の原料温度推移

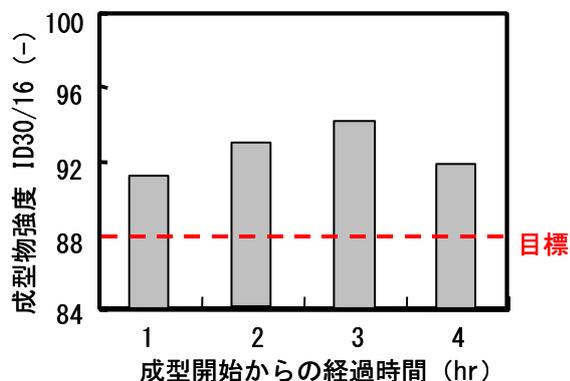


図 3-13 成型物強度測定結果

①-3 フェロコークス強度向上のための新規バインダー開発

(1) 開発概要

先導研究では、フェロコークス強度改善のためのバインダーとして、アスファルトピッチ (ASP) がおもに検討されてきた。ASP は硫黄分が 5-6wt% と高いことに加えて、石油精製における蒸溜残渣油から軽質油を得るための特殊な製造プロセスで副生する物質であるために、フェロコークスのバインダーとして利用するには供給能力が必ずしも十分ではないという課題があった。

本開発では新規バインダーを探索する上で、石炭や鉄鉱石粒子に対するバインダー能力だけではなく、将来の原料調達自由度、バインダー性状の制御性、さらには安価製造実現の観点から、石炭の溶剤抽出物に着目して開発を進めることとした。

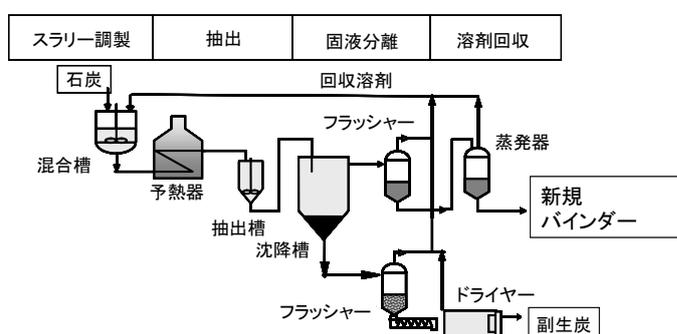


図 3-14 新規バインダー製造プロセスフロー概要



図 3-15 新規バインダー製造ユニット

新規バインダーの製造プロセスの概要を図 3-14 と図 3-15 に示す。本プロセスは、粉碎された石炭と溶剤を混合するスラリー調製、それを高温・高圧で処理する抽出工程、抽出物である新規バインダーと未溶解成分である副生炭を重力沈降により分ける固液分離工程、さらに各製品を溶剤と分離して回収する製品回収工程のおもに 4 つの工程から構成される。本法は、従来の溶剤精製炭などと異なり、高価な水素や触媒を使わない、比較的低温・低圧である、特殊な溶剤を使わず溶剤抽出工程で石炭から自生するメチルナフタレン類を溶剤として循環使用する、重力沈降で固液分離するなど、コスト競争力のあるバインダー製造プロセスになりうると期待される。

この石炭溶剤抽出による新規バインダーを基本として、製造条件の最適化や改質処理による新規バインダーの改良と新規バインダーの物理化学的解析をおこなうとともに、改良新規バインダーを用いたフェロコークスの試作と評価を実施した。さらに、得られたフェロコークスについて微細構造解析による強度支配因子の解明に取り組んだ。

(2) 主な開発成果

1) 軟化・流動性の制御された新規バインダーの製造

新規バインダーの加熱時の流動性制御方法を検討し、溶剤抽出温度を最適化することにより、

ASP では実現できない低軟化点、または、高軟化点の新規バインダーを製造できることを見出した (図 3-16)。すなわち、最も高収率でバインダーが得られる標準的作業温度である 380°C抽出では、軟化開始温度が 230°C程度のバインダーが生成するが、抽出温度を 410°Cとすることにより、軟化温度が 170 度と低い新規バインダーが得られることが分かった。バインダーの収率は 380°Cの 53-54%に対して 410°Cでも 51-52%と収率低下はわずかに留まった。高温抽出により低軟化点バインダーが生成するのは、より高温の抽出過程で石炭成分の分解と重縮合の両方がやや活発になるが、分解反応により生成する低分子量成分は流動性向上に寄与するが、重縮合で生成する巨大分子 (軟化を妨げ、流動性を低下させる) は、不溶化して副生炭側に移行するため、バインダー成分への影響が少ないためと考えられる。新規バインダーの分析値を ASP と比較して表 3-7 に示す。本新規バインダーは炭素含有率や揮発分割合 (VM) の点では ASP とほぼ同等であり、類似した炭素化特性を示すと考えられる。また、ASP より硫黄含有率が顕著に低いことは、高炉における利用では環境対策への負荷が小さい点で好ましい性質と考えられる。

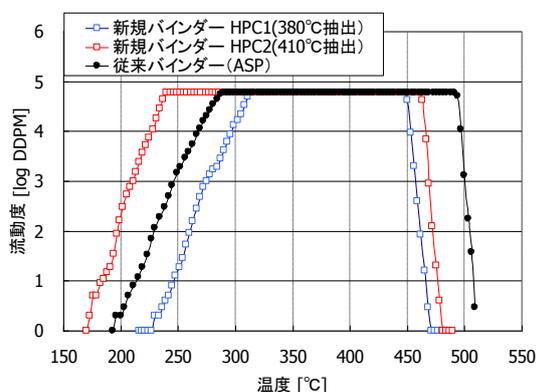
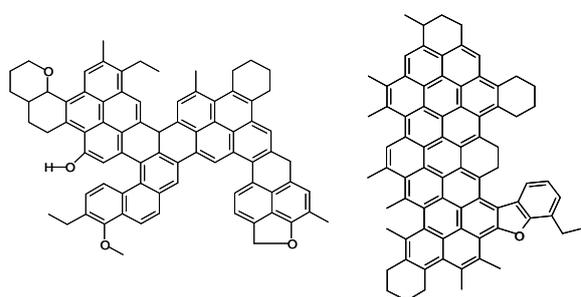


図 3-16 新規バインダーのギーセラー流動性曲線

表 3-7 新規バインダーの分析値

試料	ASH [wt%] (db)	VM [wt%] (daf)	元素分析 [wt%] (daf basis)						
			C	H	N	S	O diff	H/C	O/C
原料石炭	12.8	34.1	80.9	5.5	1.9	0.6	11.1	0.81	0.10
HPC-1 380°C抽出	0.3	50.8	86.0	5.9	2.0	0.6	5.6	0.83	0.05
HPC-2 410°C抽出	0.1	54.0	86.7	5.8	1.8	0.6	5.1	0.81	0.04
RC 380°C抽出	18.3	25.2	84.7	4.9	2.0	0.6	7.8	0.69	0.07
RC 410°C抽出	18.6	20.5	85.2	4.4	2.1	0.7	7.6	0.61	0.07
ASP	0.4	39.6	86.0	5.6	1.4	5.7	1.2	0.78	0.01

RC: Residue Coal (不溶解石炭)



新規バインダー (C₇₈H₆₂O₄) ASP (C₇₇H₆₀O)

図 3-17 バインダーの推定分子構造 (溶剤可溶分)

おり、結晶構造のよく発達したコークスを生成するものと考えられた。この違いは ASP が石油精

新規バインダーについて種々の化学分析をおこなった。核磁気共鳴法やゲルパーミエーションクロマトグラフィによる分子量分布測定結果などに基づいて、分子構造を推定した結果を図 3-17 に示す。新規バインダーの特徴は ASP に比べると芳香環の縮合度が小さく、アルキル基やエーテルによる架橋構造の割合が高いことである。これらの特徴はコークス化過程において、炭素六角網目の積層構造の発達がやや遅いことを示唆する。一方、従来バインダーの ASP は 10-20 個のベンゼン環からなる巨大縮合芳香環構造を含有して

製残渣の高温熱処理により製造されるため、この過程で芳香族化合物の重縮合が進むためと推察される。

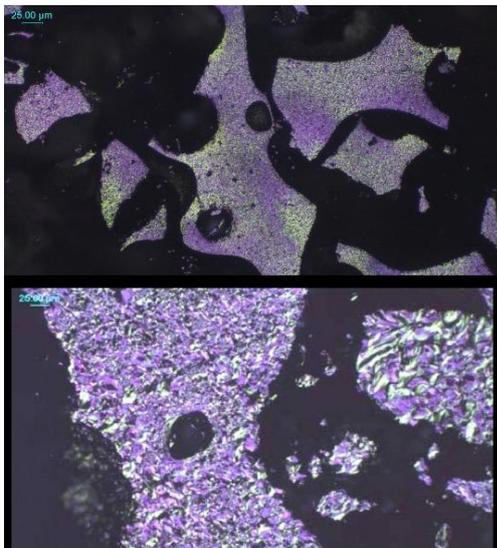


図 3-18 バインダー炭化物の偏光顕微鏡写真
真
(上) 新規バインダー (下) ASP

新規バインダーと ASP から生成するコークスの光学組織を図 3-18 に示す。新規バインダーはほぼ微小モザイク組織だけからなる。これは分子構造に由来して積層構造が発達しにくいと考えられる。微結晶から構成されるために、炭素化時の収縮による応力集中が緩和されやすく、粗大な亀裂を生じにくいと考えられる。一方 ASP は大きな流れ状組織が卓越し、多くの亀裂が生じていることがわかった。これは炭素化時の結晶構造の発達と収縮により、応力集中が起こりやすいためと考えられた。このようなコークス組織の特徴は上述の原料や製造プロセスの違いによる分子構造の本質的相違に由来すると考えられた。



バインダー溶液蒸溜装置の製品回収容器を開放したところ。底部に見える茶色の物質が新規バインダー。



新規バインダーの塊
(重量約 200g)

新規バインダーを用いたフェロコークス製造試験を大規模に実施することを目的として、新規バインダー連続製造ユニット (図 3-15) による 100kg 規模の製造試験を実施した。得られた新規バインダー試作品の写真を図 3-19 に示す。軟化開始温度やギーセラ流動性などに関して、オートクレーブによる小規模製造と概ね同一の性状の新規バインダーを連続製造設備でも安定して製造できることを確認した。

図 3-19 連続製造ユニットで試作した新規バインダー

2) 改良新規バインダーによるフェロコークスの強度向上

改良新規バインダー 2 種類 (表 3-7、HPC1、HPC2) と ASP を用いて、ベンチプラントによるフェロコークスの製造試験と評価をおこなった。フェロコークスの原料配合を表 3-8 に示す。所定の

表 3-8 フェロコークス試作における成型水準

	石炭A	石炭B	鉱石A	ASP	HPC1	HPC2	SOP	備考
No. 1	26.6	39.9	28.5	2.0			3.0	比較材
No. 2	↑	↑	↑	1.0	1.0		↑	ASP/HPC=1/1
No. 3	↑	↑	↑	1.0		1.0	↑	↑
No. 4	↑	↑	↑		2.0		↑	HPC=2
No. 5	↑	↑	↑			2.0	↑	↑

条件で原料をダブルロール成形してグリーン成型体を製造し、ラボ乾留炉で熱処理してフェロコークスを得て (図 3-20)、I 型強度を測定した結果を図 3-21 に示す。

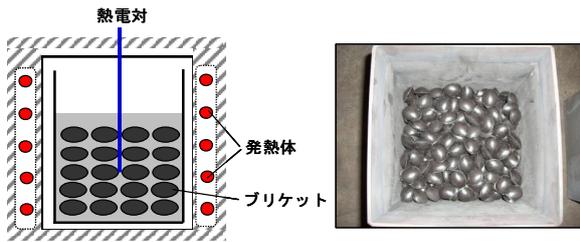


図 3-20 ラボ乾留炉概略図と成型物充填状態

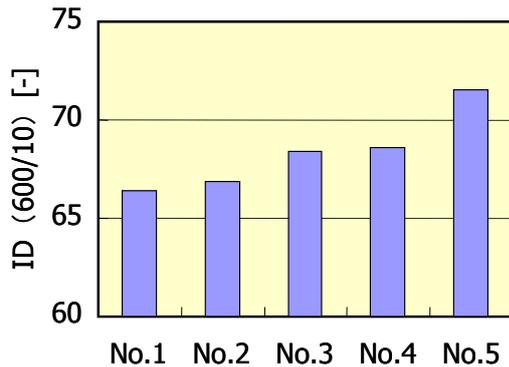


図 3-21 フェロコークスの I 型強度

ASP を 2% 使用した No. 1 が最も強度が低く、ASP を 1% ずつ順次、新規バインダーと振り替えるとともに強度は増加し、低軟化点新規バインダー HPC2 を 2% 使用した場合 (No. 5)、ASP より 5 ポイント高い、高強度のフェロコークスが得られることがわかった。新規バインダーによるフェロコークスの強度向上をより大規模の試験で確認するため、フェロコークスパイロットプラント

を用いて、同様の試験を実施した。その結果、パイロットプラントでの連続製造試験でも新規バインダーによりフェロコークスの強度が向上することが確認された。低軟化点で流動性に優れた新規バインダーを用いることで石炭粒子、あるいは鉄鉱石粒子間の接着が改善され、しかも、新規バインダーは亀裂の少ない緻密なコークスを生成するために、フェロコークスの強度向上に効果的であるものと推察された。

3) フェロコークスの強度支配因子の解明と強度向上指針の提示

フェロコークスの微細構造を明らかにするため、X 線 CT による三次元画像を解析する手法をフェロコークスに初めて適用した。

図 3-22 に X 線 CT 画像の一例を示す。この X 線 CT 画像を図 3-23 に示す手順にしたがい画像処理し、気孔、コークス基質、鉄鉱石由来の鉄の三成分に識別し、フェロコークスの微視構造を再現した。さらに、三次元の気孔壁厚分布をもとに、圧壊荷重印加条件下でフェロコークスに生じる

応力分布を三次元解析した。なお、本解析の解析領域は 4.5 mm、分解能は 32 μm である。

図 3-24 に新規バインダーの配合割合が異なるフェロコークス試料 (配合率 0-15%) の気孔壁厚分布を測定した結果を示す。新規バインダーを配合したフェロコークスは、未配合のコークスと比較して、気孔壁が厚い基質の割合が増加していることがわかる。そのため、新規バインダーは石炭粒子の接着改善に寄与している

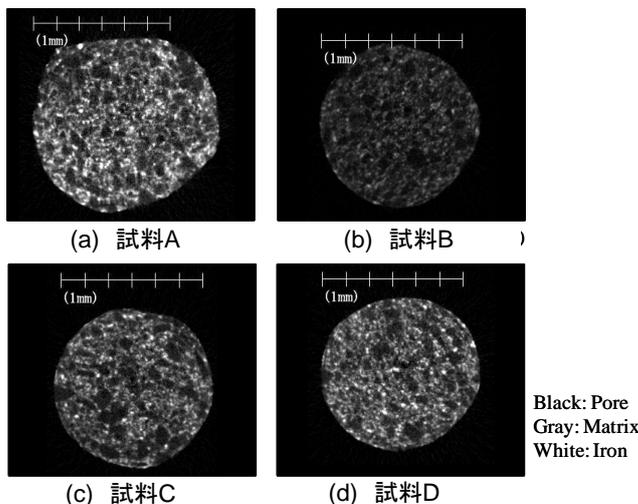


図 3-22 フェロコークスの X 線 CT 画像

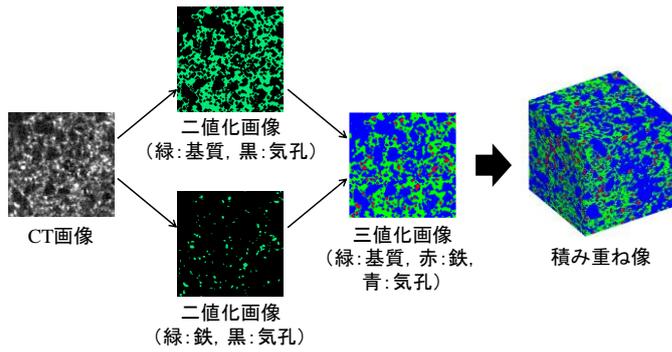


図 3-23 有限要素メッシュ生成までの手順

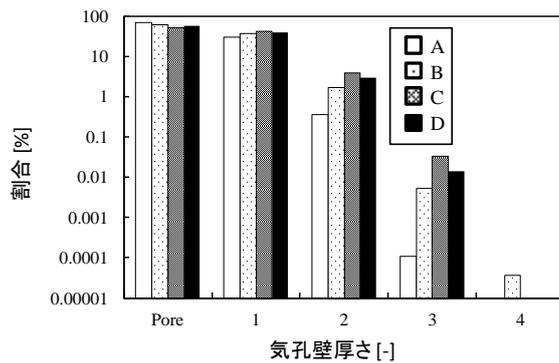


図 3-24 新規バインダー配合フェロコークスの三次元微視構造における気孔壁厚さ分布
バインダー割合 (%) : A 0、B 5、C 10、D 15

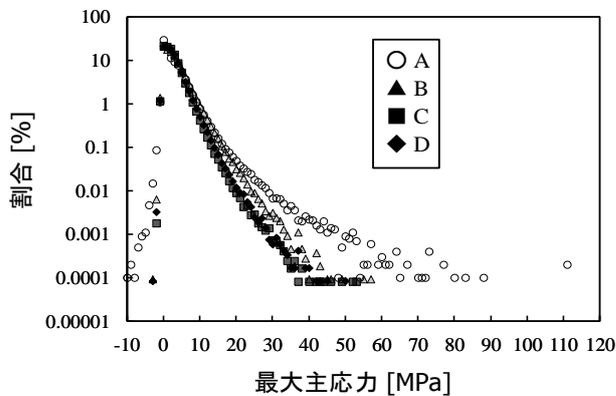


図 3-25 試料 A-D の最大主応力分布

ことが確認された。フェロコークスにおける破壊現象を微視的に解析するために圧壊荷重下での最大主応力分布を X 線 CT 画像の三次元応力解析により推定した結果を図 3-25 に示す。新規バインダーを配合したフェロコークスにおいて最大主応力が減少する結果が得られた。これは、新規バインダーの配合により、応力集中の起きやすい気孔壁が薄い部分の割合が低下したためであると考えられる。

以上の結果から、フェロコークス強度の支配因子として気孔壁厚さ分布が重要であることを示し、新規バインダーの添加により石炭粒子同士の接着性が改善され気孔壁が薄い部分の割合が低下するために応力集中が軽減され強度が向上することが示された。

強度向上指針として、石炭粒子の接着性をより一層改善することが重要であり、乾留過程において石炭粒子と相互に接着しやすい、流動性の改善された新規バインダーが有効であることを提示した。

②フェロコークスの製造プロセスの開発

②-1 実験室規模での適正乾留条件探索

図 3-26-1 に示す実験室規模の電気抵抗加熱方式乾留炉を用いた乾留実験を行い、フェロコークスの還元率、強度に及ぼす最高到達温度、最高到達温度での保持時間および昇温速度の影響を調査した。

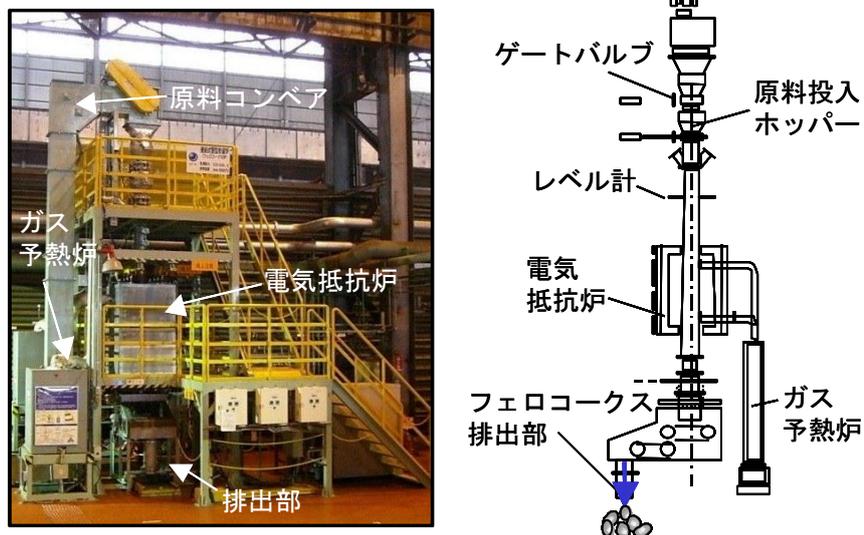


図 3-26-1 実験室規模 電気抵抗加熱方式乾留炉

その結果、図 3-27-1 に示すように還元率は炭中温度の上昇、乾留時間の延長とともに増加し、乾留後強度は乾留時間によって異なるが極大値を持つ、目標とする還元率、強度を得るためには以下の乾留条件での操作が必要であることが明らかとなった。

[還元率・強度を両立するための操業条件]

- ・ 最高到達温度：850℃、最高到達温度での保持時間：3 時間
- ・ 最高到達温度：900℃、最高到達温度での保持時間：1~2 時間

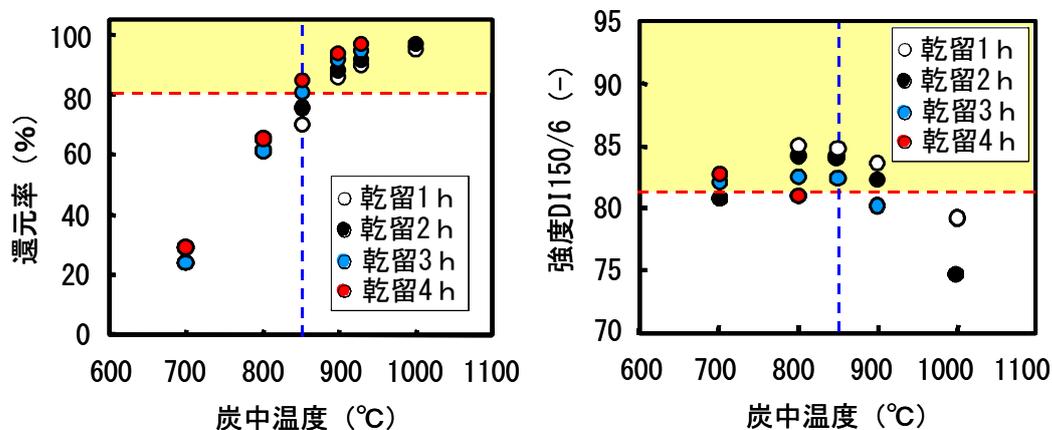


図 3-27-1 炭中温度と還元率・強度の関係

②-2 30t/d 規模パイロット型縦型乾留炉の設計

(1) 炉高方向の温度分布制御

炉高方向の温度分布制御に関しては、平成 21 年度②-1 実験室規模での適正乾留条件探索において、実験室規模の電気抵抗加熱方式乾留炉を用いた乾留実験を行い、フェロコークスの還元率、強度に及ぼす最高到達温度、最高到達温度での保持時間および昇温速度の影響を調査した。その結果、目標とする還元率、強度を得るためには②-1 に示したような乾留条件での操作が必要であることが明らかとなった。

そこで 30t/d 規模パイロット型縦型乾留炉の設計段階において、目標とする還元率・強度を得るために熱流体シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、乾留炉内の温度分布、ガス流速分布を 3 次元で解析し、設備の適正化・操作条件の適正化を検討した。(図 3-26-2 参照) 炉内温度解析結果については、1 次元のシミュレーション結果との整合性を確認した。

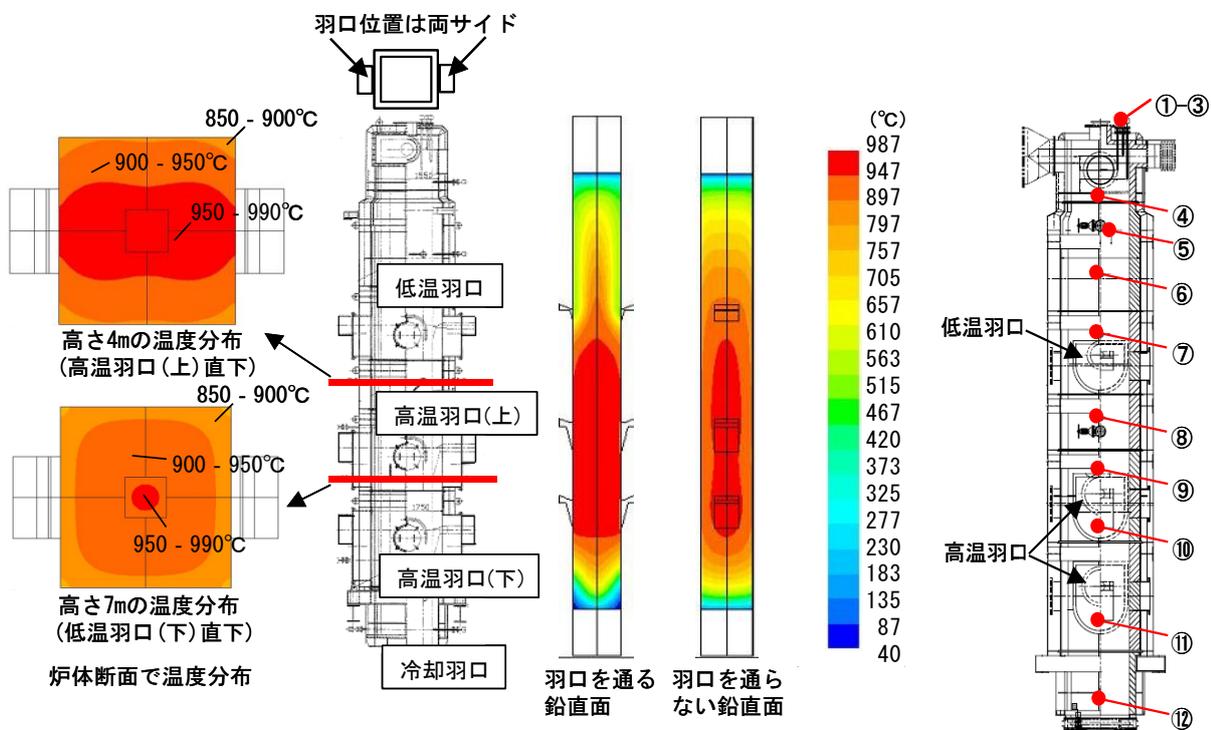


図 3-26-2 縦型乾留炉熱流体シミュレーション

図 3-27-2 温度測定位置

また、パイロットプラントでは炉頂に 3 箇所、高さ方向に 9 箇所に熱伝対を設置 (図 3-27-2 参照) し、実測データをシミュレーションに反映できるようにした。

(2) 金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムの構築

金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムの構築に関しては、平成 21 年度②-2 30t/d 規模パイロット型縦型乾留炉の設計において、乾留後フェロコークスの冷却条件と還元率の関係を調査し、排出方法に反映させた。

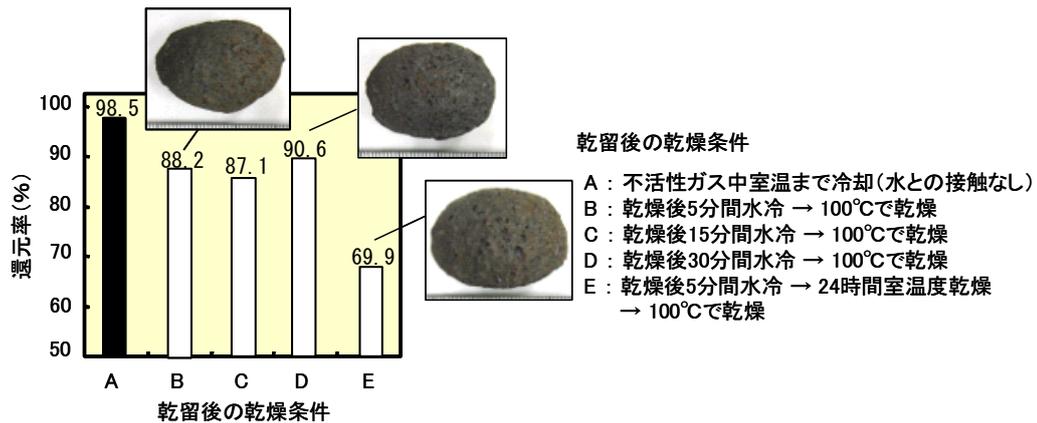


図 3-28 乾留後の乾燥条件と還元率の関係

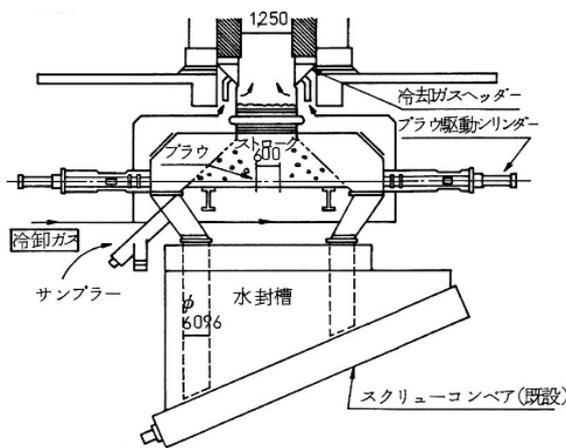


図 3-29 水冷式排出装置

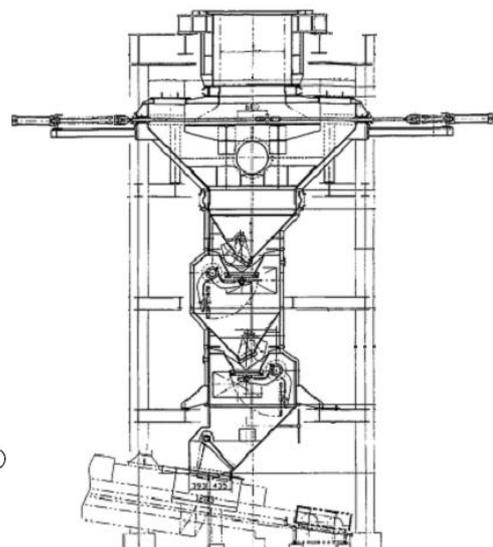


図 3-30 乾式排出装置

その結果、水との接触（水冷方式）により冷却時間を短縮することは可能であるが、水との接触が僅かな時間であっても乾燥後の還元率は低下し、水冷後乾燥しなかったものは更に還元率が下がることが明らかとなった。（図3-28参照）

過去に国家プロジェクトとして実施された連続式成型コークス製造法の開発（昭和 53～61 年）においては、乾留炉内と排出装置のガスシール性及び製品の冷却性を兼ね備えた排出装置として、往復プラウの下部に水封槽を設けた水冷式排出装置（図 3-29 参照）が採用されている。二つの機能を有する排出装置として非常に優れているが、フェロコークスのような金属鉄を含有する材料では、金属鉄の再酸化が懸念される。そこで今回のフェロコークス乾留設備の排出方式は乾式方式（図 3-30 参照）とした。

(3) 循環ガス成分がフェロコークス強度に与える影響

高温還元試験装置を使用して、循環ガス組成がフェロコークス強度に与える影響について調査した。試験条件としては乾留炉の高温羽口レベルを想定し、900℃、1000℃で行なった。(図3-31, 32参照)

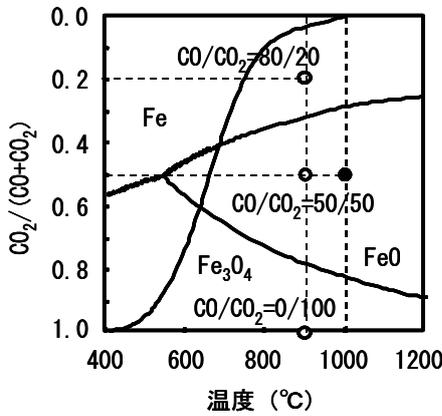


図 3-31 Fe-C 系状態図

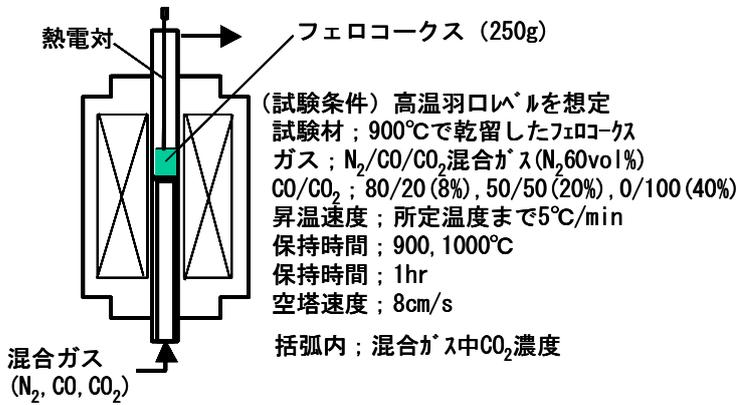


図 3-32 高温還元試験装置

循環ガスの代替としてN₂/CO/CO₂混合ガスを使用した。混合ガス中のCO₂濃度の上昇に伴い強度は低下し、その傾向は1000℃で顕著であった。(図3-33参照) さらに循環ガス中の水分の影響について調査を行なった。循環ガス同様、乾留炉の高温羽口レベルを想定し、900~1000℃で実施した。試験後のフェロコークス強度は、ガス中水分が高いほど強度低下が大きく、その傾向は温度が高い条件ほど顕著であった。(図3-34参照)

(1) ~ (3) および各要素技術の成果に基づき、循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉の設計を実施した。

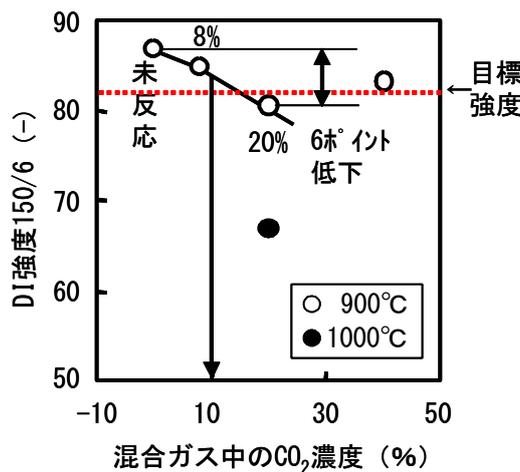


図 3-33 循環ガス中 CO₂ がフェロコークス強度に与える影響

パイロットプラントの建設にあたっては、2009年7月から原料・成型・乾留炉設備の設計を開始し、翌年12月、原料・成型設備は据付工事を完了し年度内に試運転を終了した。乾留炉設備も原料・成型設備と同時期に設計を開始したが、ガス精製設備などの付帯設備の据付工事を一部残し、2011年3月末までに炉本体の据付まで完了し、2011年4月から試運転を終了した。パイロットプラントは、JFEスチール東日本製鉄所構内（京浜地区）に設置されることになり、設計、機器の購入、据付工事等の業務はJFEスチール（株）が担当し実行した。パイロットプラントの建設予定場所の位置を図3-35に示す。

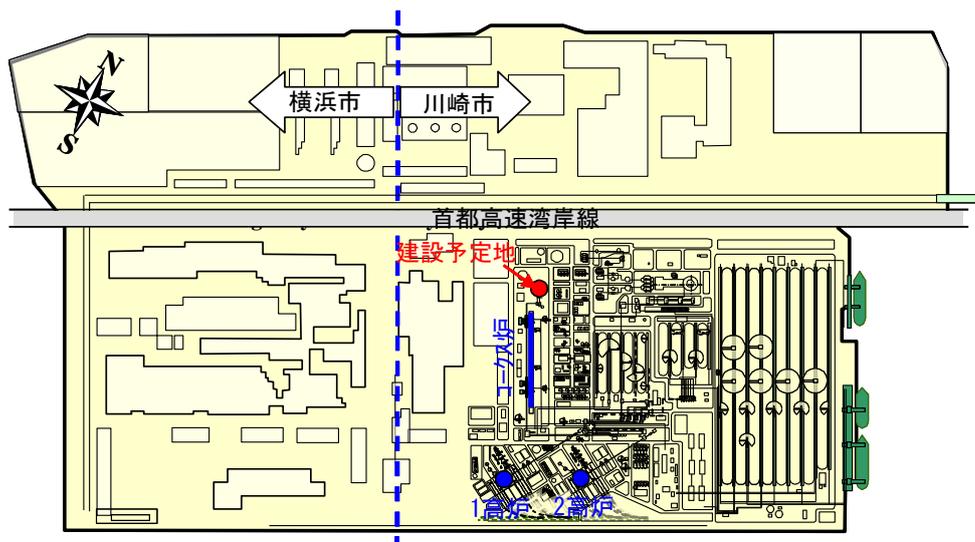


図 3-35 建設予定場所の位置（JFE スチール東日本製鉄所、京浜地区）

基礎工事は 2010 年から実施し、予定通り同年度末までに乾留炉本体までの据付工事を完了（図 3-36 参照）した。



図 3-36 パイロットプラント全景

(2) 成型・乾留一貫製造試験

耐火物乾燥後、小塊コークスを充填した状態での操業条件の検討試験を行ない、フェロコークス生産量 30t/d での羽口条件で少量乾留試験を実施した。その結果、羽口温度が目標温度に到達しないことが判明した。様々な検討を行った結果、循環ガスダクトの断熱性能を向上させることが必要であることが明らかとなった。各羽口の目標温度到達を達成するために、キャストブルの熱伝導率を約 1/4 としたダクトに改造し、さらにダクトの接続方法もバンド溶接からフランジ継ぎ手に変更することで所定の目標温度に到達した。

ダクト改造後、乾留炉への装入物を小塊コークスから成型物に切り替え、成型物の大量乾留時におけるフェロコークスの品質および操業への影響調査を実施した。成型物投入前の操業条件は、低温羽口温度 500°C、高温羽口温度 940°C、高温羽口風量 1,800Nm³/h、冷却風量 940Nm³/h であった。小塊コークスを全て乾留炉内から排出し、成型を開始して 19t の成型物（約 12t で乾留炉内が成型物で充填）を炉内へ連続投入した。成型物降下速度 30t/d 相当での乾留炉送風温度推移を図 3-37 に示す。成型物投入後、高温羽口の温度が約 30°C 低下した。成型物投入開始直後から成型物からのガス発生が認められ、発生ガス中のメタンが昇温バーナー内で熱分解したためと推察される。循環ガスの EP 出側組成は、定常状態で水素 19.2%、一酸化炭素 7.8%、二酸化炭素 5.5%、メタン 7.3% であった。発生ガス量に応じて放散弁の開度が調整され、炉頂圧は目標の 1.2kPa を保持し、炉頂圧制御に問題は認められなかった。炉頂温度は、計画値通り約 315°C を保持した。

大量の成型物を投入する場合、発生タールが炉頂付近の成型物表面に吸着し融着する恐れが懸念された。しかし、融着したフェロコークスの排出は認められず、炉内圧力はほぼ一定でフェロコークスが安定に切出されることを確認した。フェロコークスのドラム強度（150 回転、6mm 指数）は、目標値 82 以上に対し 79-82 とほぼ同等であった。還元率は目標値 70% 以上に対し、80-93% と十分であった。ダクトの改善により高温羽口温度が上昇したことに加え、大量の成型物を投入した場合、還元性のガスである水素や一酸化炭素が成型物から連続的に放出されるため、炉内が強還元雰囲気であったと推察される。

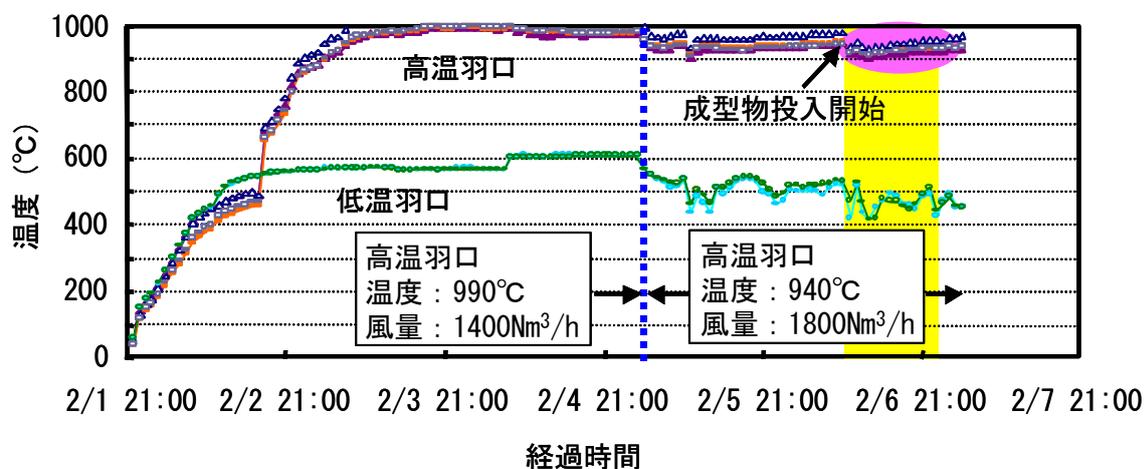


図 3-37 大量乾留試験時の温度推移

②-4 長期製造試験と品質評価

(1) 連続操業試験のための設備増強

各羽口での循環ガス温度の低下を抑制するために循環ガスダクトの改造において誠意検討し、各羽口先での目標温度を達成することができた。ダクト改造後、試験操業を行ってきたが安定的に長期連続操業を実施する上で改善が必要と考えられる設備あるいはプロセスが判明した。そこで、安定した長期連続操業試験を実施するために、試験操業間の定修期間において以下の項目の設備増強を検討した。操業試験・定修の当初計画を表3-10に示す。

表3-10 操業試験・定修の当初計画



1) 鉱石の配合率制御向上のための設備改造

ラボ試験で実施した石炭および鉱石の総重量中の鉱石重量率とフェロコークスおよび成型物強度との関係を表したグラフを図3-38に示す。鉱石重量率の上昇に従い、両強度とも低下傾向にあることが分かった。鉱石重量率の調整は重要と考えられる。第3次操業までの試験では、鉱石および石炭の切出し量を中間ホッパー底部の切出しコンベアおよび秤量コンベアで調整し、図3-39の黒線で示した概略図に示すように粉碎後石炭と鉱石をフライトコンベアで混合し、乾燥機およびサージホッパーを通して混練機へ搬送していた。図3-40に成型物中の鉱石重量率の推移を示す。鉱石重量率の設定は30%であったが、実測値は27~32%までばらついていた（第3次操業：8月1日~8月9日）。比重の異なる石炭および鉱石混合物をフライトコンベア、乾燥キルンおよびサージホッパーへ搬送中に比重差で分離したと推察される。そこで、図3-39の赤線で示すように鉱石と粉碎炭を混練機直前で混合する、すなわち鉱石別送ラインを増設した。石炭とは別に鉱石単独で網目3mmの振動篩で篩った後、乾燥機へ通して鉱石サージホッパーで貯鉱した。図3-40に別送化による鉱石重量率の推移を示すが、28~30%に変動が抑制されることがわかった（第4次操業：8月25日~9月8日）。図3-41に成型物強度と成型物中鉱石重量率の関係を示す。鉱石別送ラインを設置して成型物中の鉱石重量率の変動を抑制したことにより、成型物強度のバラツキ抑止および平均強度の上昇を確認することができた。

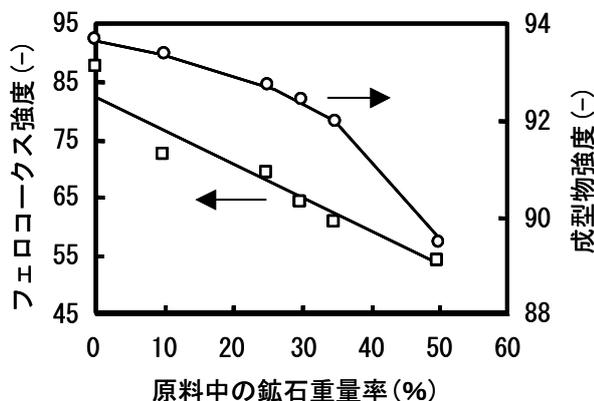


図3-38 フェロコークス・成型物の強度と鉱石配合比率

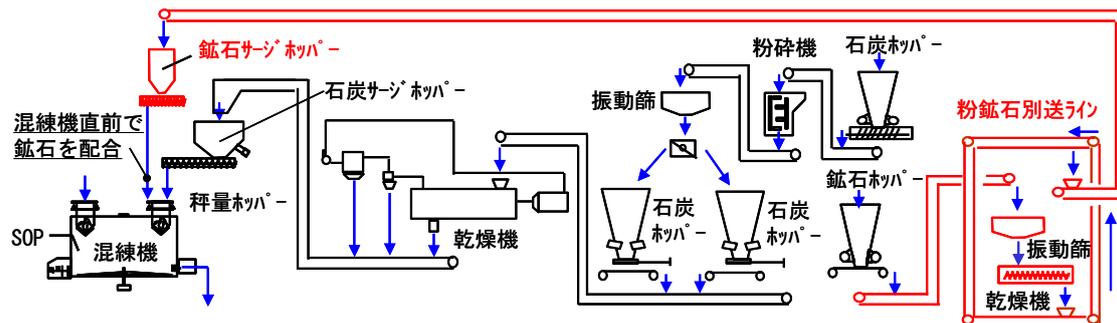


図 3-39 粉鉱石別送ラインの装置概略図

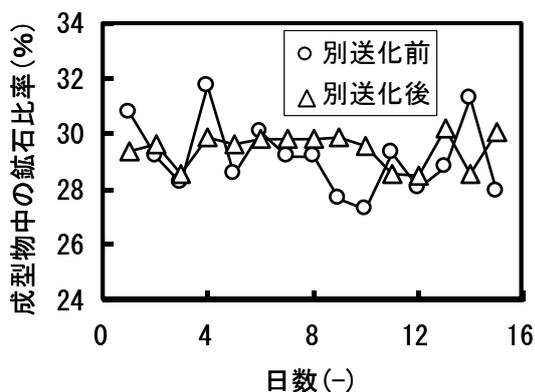


図 3-40 成型物中の鉱石比率の推移

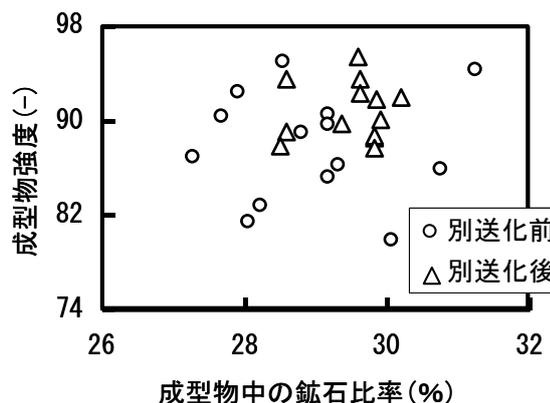


図 3-41 成型物強度と成型物中鉱石比率

(2) 長期操業試験の概要

パイロットプラントの成型-乾留連続操業試験は、2012年5月に操業を開始し、2013年2月に終了した。この試験は、10ヶ月間に7次に亘る試験操業を実施した。全期間における操業日数は延べ197日、フェロコークスの総生産量は、3,417t、このうち高炉使用試験のサンプル量は、2,100tに達した。

5月中旬～下旬にかけて実施した第1次操業では、原料供給・乾燥設備からの原料供給量、成型設備での原料受入れから成型物排出までのサイクルタイムおよび乾留炉本体での乾留時間を詳細に検討し、物量をバランスさせ、安定操業技術を確立した。さらに、6月中旬から下旬にかけて実施した第2次操業においては、途中台風の影響で操業停止を余儀なくされた以外は特に大きなトラブルもなく、石炭の粉砕粒度、成型設備への原料供給温度、成型ロールの圧力・回転数および乾留における操業条件を検討し、製造技術の確立を目指した。第3次操業から高炉使用試験用サンプルの備蓄生産を開始し、第7次操業の終了まで継続した。各操業の合間に、定修期間も設け機器の清掃、不具合部分の修理、試験操業適正化のための設備改造などを実施した。第2次操業後の定修では、1)で示したように原料配合比率を均一化するために鉱石搬送ラインの改造工事を実施した。

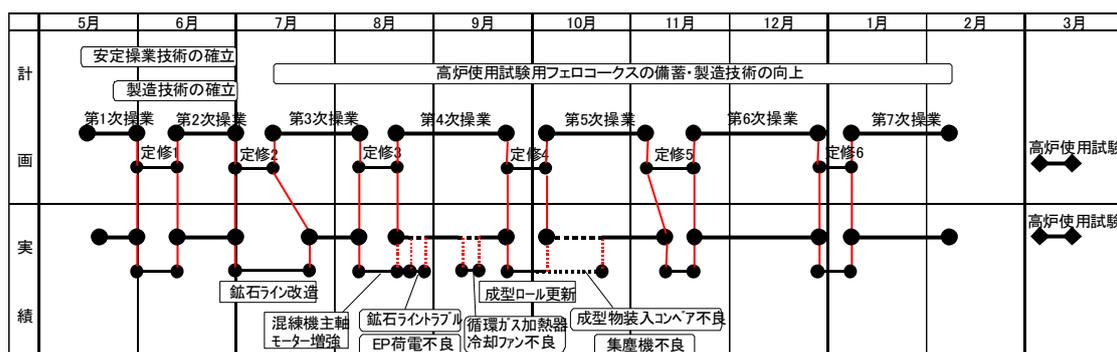


図 3-42 パイロットプラントの操業試験の経過概要

第 3 次操業は、7 月中旬からの試験操業開始であったが、開始早々、高温羽口西側の昇温バーナーが失火するトラブルが発生した。解体調査したところ、燃焼室に発生した約 20cm のカーボンの塊が火炎検知器を遮る形で存在していたためと判明した。その他、改造した珪石搬送ラインのトラブル、珪石切出しコンベアのテンションロールの脱落などトラブルが頻発したため、試験操業の再開は 7 月下旬まで延びることとなった。第 3 次操業後の定修では、珪石搬送ラインの不具合を解決すべく改造工事を実施し、再度、珪石搬送ラインの別送化を試みた。さらに、第 3 次操業まで使用していた混練機の主軸モーターは、長時間の連続成型では負荷電流値が高い値を示し、今後さらなる連続成型において、焼き付く可能性があるため、容量が大きいモーターに更新した。

第 4 次操業では、操業開始初期段階で電気集塵機の荷電不良等のトラブルがあったが、特に大きなトラブルもなく、これまで最長 30 日間の連続操業を達成した。定修では、これまで同様、乾燥キルン・混練機・炉本体・ガス精製など主要設備の内部の点検・清掃を行った。

第 5 次操業においては、成型-乾留連続操業を開始してから約半年ということもあり、駆動系のベルト・チェーンの破断やベアリングの損傷など劣化による不具合が頻発するようになったが、操業日程が大幅に遅れることなく試験操業を継続することができ、連続操業日数は 41 日に達した。第 6 次・第 7 次操業の期間においては、乾留設備の停止時間もなく、高炉使用試験用サンプルを目標量製造し試験操業を完了した。

(3) 操業実績 (第 7 次操業)

第 7 次操業では、956t の原料石炭を使用し、1,423t の成型物を製造した。原料石炭の配合比率は、微粘炭 60wt%、非粘炭 40wt% で開始したが、途中、微粘炭の MF (最高流動度) に変化があり、融着防止のために微粘炭の配合比率を 55wt% まで下げて操業を実施した。

表 3-11 に第 7 次操業の成型条件および乾留条件を示す。

表 3-11 第 7 次操業の成型条件および乾留条件

バインダー	ASP (wt%)	2.2	高温羽口	風量 (Nm ³ /h)	2187.1
	SOP (wt%)	3.7		温度 (°C)	843.4
混練機	1速 (秒)	31.0	冷却羽口	風量 (Nm ³ /h)	2430.5
	2速 (秒)	64.9		温度 (°C)	49.1
	3速 (秒)	131.6	抽出羽口	風量 (Nm ³ /h)	1421.2
ロール	回転数 (rpm)	2.3		温度 (°C)	128.8
	圧力 (t)	103.3	製品切出し速度 (t/d)	27.5~32.5	

成型物の製造にあたっては、これまでの試験操業の実績に基づき、成型用原料を 200kg/チャージに固定し、混練時間は約 5 分間とすることを基準条件として成型を行った。試験操業中、原料搬送コンベアのトリップ、粉碎機のインバーター異常などの現象がおきたため、炉頂から成型物ではなく排出されたフェロコックスを装入し、炉頂のストックラインレベルを維持する操業を実施した。試験操業期間後半では、成型ロールの磨耗が激しくなってきたため、成型ロールの圧力を 105t から 95~98t に下げて成型を行った。成型圧を 105t で操業していた操業開始日から 1/30 の成型物の平均強度は 93.3、成型圧を 95~98t に変更してから操業最終日までの平均強度は 93.6 であり、成型圧変更による強度への影響はなかった。

乾留トレンドデータを図 3-43 に示す。乾留炉の操業にあたっては、昨年度の操業実績に基づき、製造量を 27.5~30.0t/d とし、過乾留を抑制するために高温羽口温度を 50°C 程度下げ、850°C 前後に設定することを基準条件として乾留を行った。原料・成型設備のような大きなトラブルもなく、第 7 次操業終了まで比較的安定な操業を継続することができた。操業期間は、1 月 8 日~2 月 6 日までの 30 日間、この間 740 t のフェロコックスを製造し、目標強度 DI150/15>81 を超えたものが 693 t（歩留 93.5%）で目標製造量に達し、試験操業を終了した。

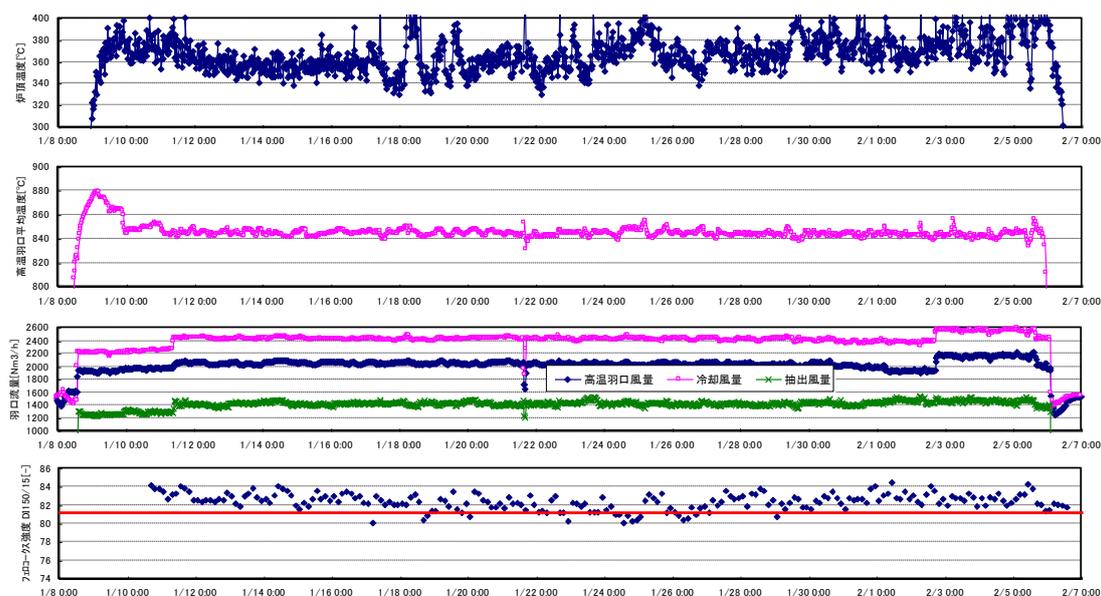


図 3-43 第 7 次操業 乾留関連トレンドデータ

(4) 製品排出装置 往復動プラウの劣化状況

フェロコックスは、金属鉄を含有するため水に濡れると再酸化され錆びが発生する。そのため、金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムの構築に関して、平成 21 年度②-2 30t/d 規模パイロット型乾留炉の設計において、乾留後フェロコックスの冷却条件と還元率の関係を調査し、排出方法に反映させた。その結果、図 3-44 に示すように、往復動プラウの下部に二重シール弁を二段に設置した乾式排出装置を採用した。

乾留設備において、耐火物の劣化状況の次に注力すべき劣化損耗部位として、往復動プラウが挙げられる。そこで今回、第7次操業終了後、往復動プラウの堰部分の磨耗状況の確認を実施した。2012年5月に操業を開始し、2013年2月に終了するまで、この間、往復動プラウの操業日数は延べ181日間、実稼動時間は4,165時間であり、フェロコークスの生産量は、3,417tであった。図3-45に乾式排出装置上部の往復動プラウを示す。往復動プラウはテーブル(1,350mm x 2,623mm)上の高さ200mm、幅50mm、長さ1,344mmの堰を両サイドの油圧シリンダーで交互に引っ張り、紙面上左右に動かし、乾留炉からは排出されテーブル上に安息角で堆積するフェロコークスをテーブルの左右端部から掻き落とす構造となっている。

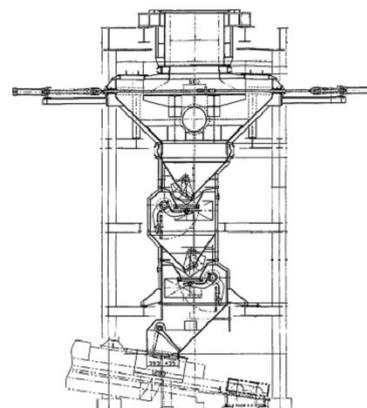


図 3-44 乾式排出装置

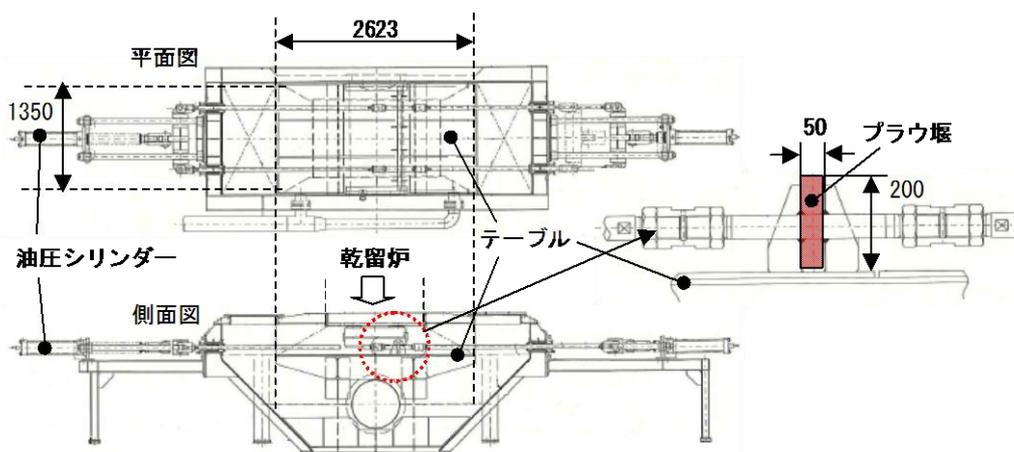


図 3-45 往復動プラウの平面図および側面図

プラウの損耗状況は、平面図の下部から上部に向けて堰の幅および高さを測定した。測定結果を図3-46に示す。測定の結果、プラウ堰の壁側両サイドは、1.5mm~2.0mm程度の磨耗が確認されたが、中央部は5.0mmと両サイドの約2倍の磨耗が確認された。最も磨耗が激しかった中央は、今回の生産量の4倍程度でプラウ堰をサポートしている留め金具に達するため、約2年程度でのプラウ堰の更新が必要と考えられる。

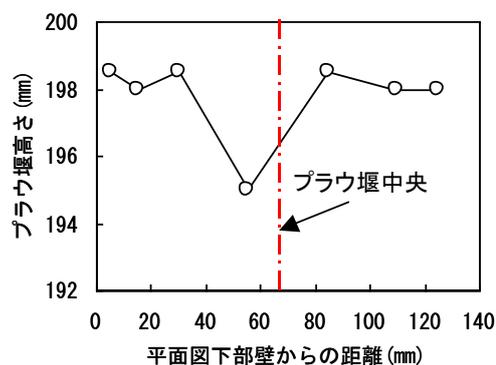


図 3-46 プラウ堰高さ測定結果

(5) 高炉への試験装入

1) 小型炉での装入試験

大型高炉での使用試験に先立ち、通気性への影響に関する味見試験として、小型の縦型精錬炉（内容積 140m³）へのフェロコクス装入を実施した。

試験で使用した縦型精錬炉は、高炉に比べて酸化鉄原料の CO ガス還元による比率が小さく、カーボンによる直接還元の比率が大きい。結果として、炉頂ガス中の CO₂/(CO + CO₂) の値は、高炉では 0.5 前後であるが、縦型精錬炉では 0.05~0.08 という特徴を有する。

フェロコクスの縦型精錬炉への投入経路を図 3-47 に示す。パイロットプラントで製造した製品は 1m³ の袋（フレコン）詰め状態で倉庫に保管および、炉近傍へ運搬した。所定の頻度で袋を開封し、酸化鉄原料を投入するホッパーに投入した。該ホッパーから切り出される際にフェロコクスと酸化鉄原料が混合して炉頂へ搬送され、炉内に投入される。

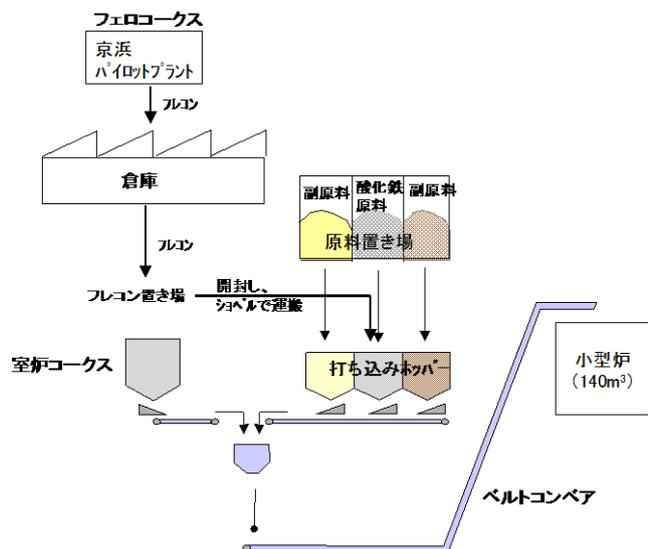


図 3-47 小型炉へのフェロコクス投入フロー

2) 小型炉でのフェロコクス使用結果

性状の異なる 2 種類の酸化鉄原料を用いた操作をベースとし、フェロコクスを使用した際の通気抵抗の変化を調査した。酸化鉄原料 1（粉状の酸化鉄を塊成化）使用時には最大 78kg/t、酸化鉄原料 2（焼結鉱）使用時には最大 113kg/t のフェロコクスを使用した。結果を図 3-48 に示す。いずれも、フェロコクス使用時の通気抵抗の上昇は認められなかった。従って、フェロコクスは炉内で通気性に影響するような粉化は起こさなかったと推察される。

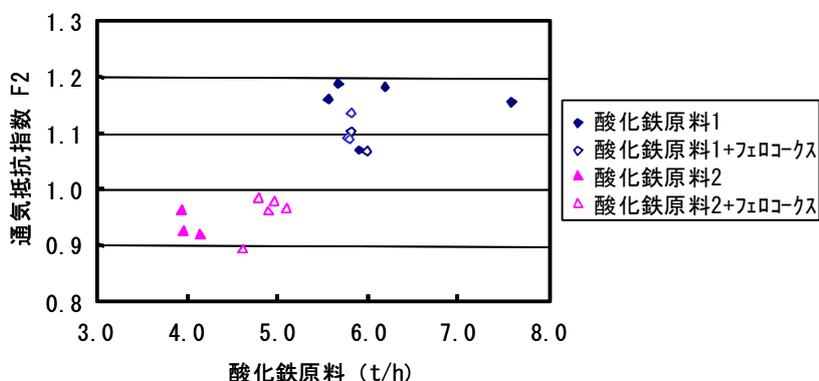


図 3-48 フェロコクス使用時の炉内通気抵抗指数

3) 大型高炉での装入試験方法

高炉へのフェロコークス投入は図 3-49 に示す経路で実施し、焼結鉱と一緒に高炉に投入されるようにホッパーから装入ベルトコンベア上に切り出した。通常のコークスはこれらとは別のタイミングで高炉へ投入する。フェロコークス使用量を徐々に増加させ、フェロコークス使用前に対するガス利用率、通気抵抗の変化を調査した。

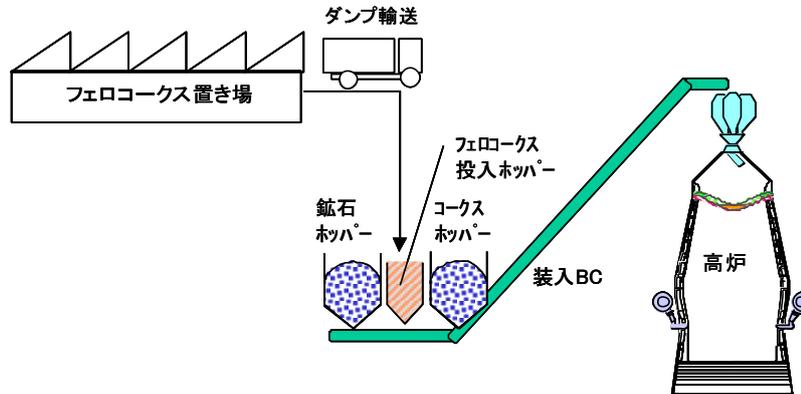


図 3-49 高炉へのフェロコークス投入方法

4) フェロコークス装入時の高炉操業要因変化

図 3-50 にフェロコークス使用時の操業推移を示す。延べ5日にわたってフェロコークスを高炉に装入し、溶銑温度を維持しながら還元材比の低減が確認できた。また、炉内の通気抵抗への悪影響は認められなかった。

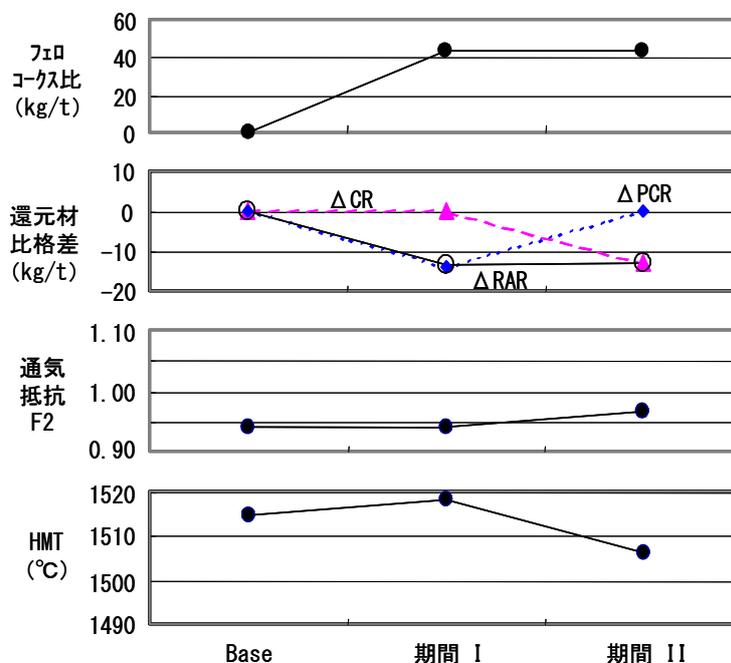


図 3-50 フェロコークス使用時の操業推移

②-5 豎型乾留炉の流動シミュレーション

(1) 豎型乾留炉の流動シミュレーション

フェロコックスを豎型乾留炉で乾留する際は、粒子個々の滞留時間の偏差をミニマムにすることが望ましい。スケールアップの指針を得ることを目的として、離散要素法による炉内流動シミュレーションモデルを開発した。前年度までに開発した離散要素法モデルを活用し、スケールアップモデルを開発するとともに、排出口の形状、排出方法が滞留時間分布に及ぼす影響、炉内支柱の粒子降下挙動への影響など炉体構造などの影響を検討した。

1) スケールアップモデルでの流動解析

フェロコックス炉プラントのスケールアップを考慮し、前年度に行った矩形豎型乾留炉を並列に5ユニット並べた形状の装置を計算の対象にした。図3-51に単一ユニット内のトレーサ分布を示す。単一ユニットでは壁の影響が大きく、壁際の粒子の降下が著しく遅れていることが判る。図3-52は、5連ユニットのトレーサの3次元透視図を示す。5連ユニットの中間部では、2面の壁の影響を受け、他の面では隣接するユニット内の粒子と接するため直接壁の影響を受けない。結果として、5連ユニットでは端部のユニットを除いてほぼ均一な降下挙動を得ることができる。

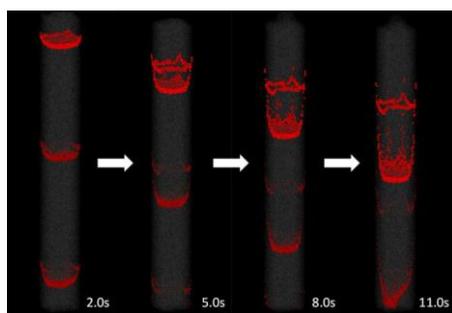


図 3-51 単一ユニットの降下挙動

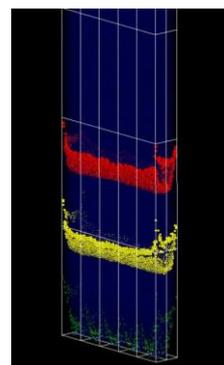


図 3-52 5 連ユニットの降下挙

2) 排出口形状の粒子降下挙動への影響

5連ユニット炉体形状で、下部の排出口を各ユニット毎に設置したケース (a)、連結した排出口を設置したケース (b) について、粒子降下挙動への影響を計算した。図3-53に計算結果を示すが、炉中部に設置したトレーサ (赤) は両ケースにおいてほぼ同一の降下速度分布となる。一方、下部、排出口近傍のトレーサ (黄色) は (a) においては各排出口への流れが生じて降下速度分布が生じるが各ユニット間では比較的均一降下となる。一方、(b) では、中央部が速く降下する降下速度分布が得られる。このようにスケールアップモデルを用いて、均一な粒子滞留時間分布を得るための各ユニット毎の排出速度分布の検討、また、排出部の構造 (各ユニット間へのテーパ部の有無)、炉内支柱が粒子降下、粒子の粉化に影響すると考えられる応力分布下部に及ぼす影響を検討し、スケールアップの指針を得ることができた。

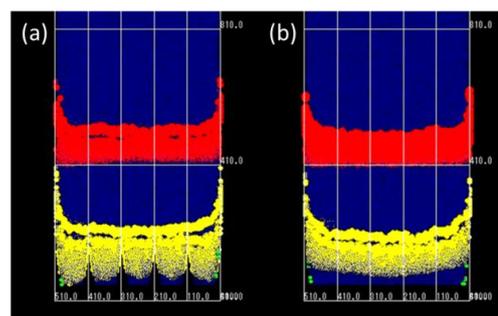


図 3-53 排出口形状が粒子降下に及ぼす影響

③ フェロコークスによる高炉操業プロセス開発

③-1-1 高炉内反応平衡制御手段の提示

フェロコークスをより効果的に使用するための最適装入条件の評価を目的に、BIS 炉 (Blast furnace inner reaction simulator) を用いた還元試験を実施した (図 3-54)。さらに、実層厚還元試験を実施し、鉱石層内へのフェロコークス混合が鉱石還元率に及ぼす影響について評価した。

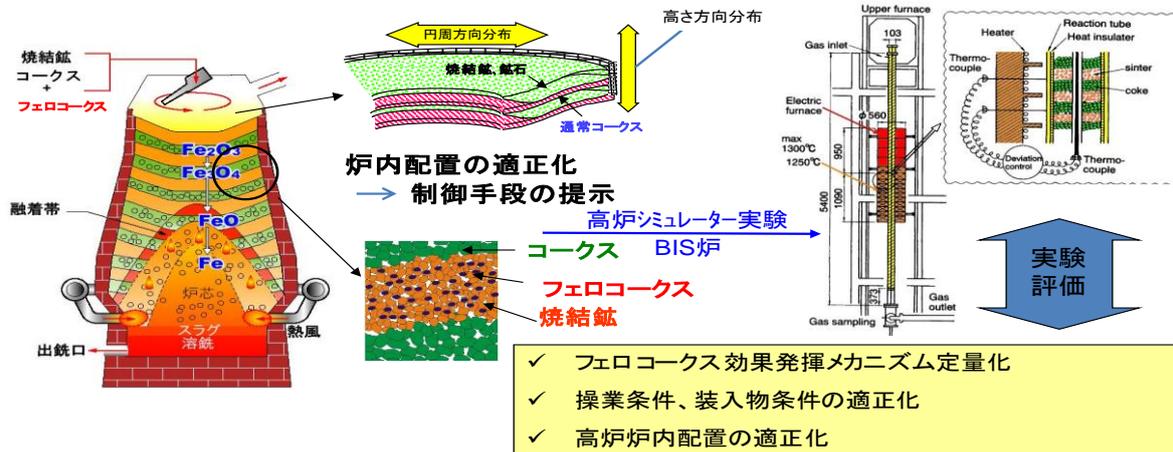


図 3-54 フェロコークスによる高炉操業プロセス開発の概要

オフラインで製造したフェロコークスの装入配置条件を変化させた、BIS 炉試験を実施した。フェロコークスを 158kg/tp 装入する条件において、装入位置を変化させた。いずれの装入条件でも、フェロコークスを混合した場合の熱保存帯温度はベースに対して約 100°C 低下しており、特に鉱石層に混合した条件の保存帯低下幅が大きかった (図 3-55)。フェロコークスを鉱石層へ均一あるいは上層へ偏析させた場合、ヘマタイト基準に補正したガス利用率はベースと比較して 3% 程度高い値となり、シャフト効率は 3~4% 程度向上した。この変化幅から、還元材比低減効果は 12.6kg/t と試算された。

一方、フェロコークスをコークス層内に装入した場合 (KA-04) は、鉱石層内に装入した場合と比較し

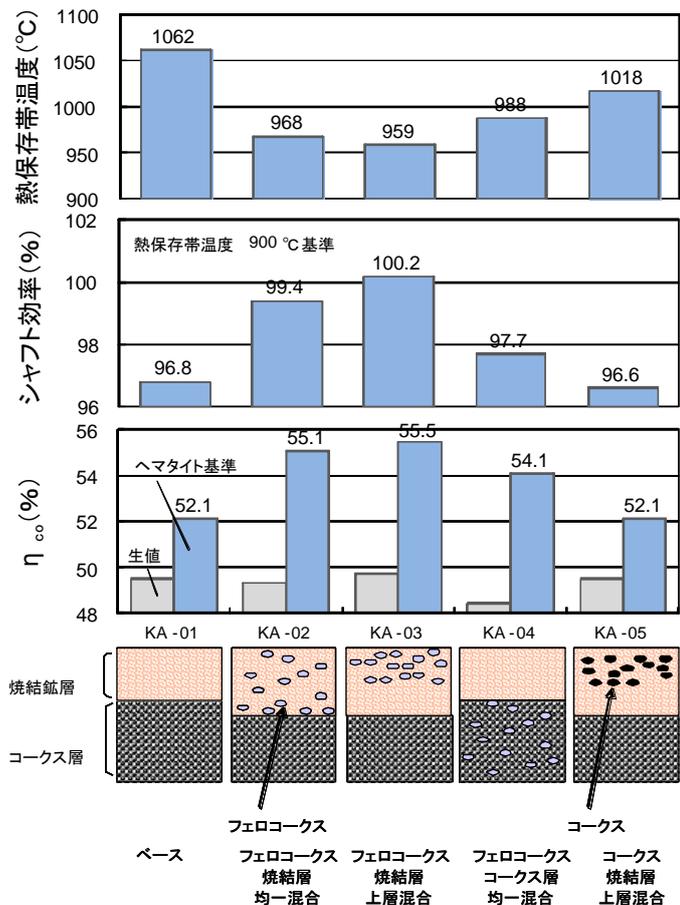


図 3-55 BIS 炉試験結果

	1	2	3	4
	ベース	フェロコークス 焼結層均一混合	フェロコークス 焼結層下層混合	フェロコークス 焼結層上層混合
装入・配置条件				
焼結鉱装入量(g/ch)	1392	1328	1328	1328
コークス装入量(g/ch)	300	210	210	210
フェロコークス装入量(g/ch)	0	134	134	134

図 3-56 実層厚試験水準

て保存帯温度低下幅が小さく、ガス利用率向上代も小さかった。

以上から、フェロコークスは、CO₂ 濃度が高い鉱石層内に装入することにより、低温からの反応量が増加し、熱保存帯温度低下幅が増加すると考えられる。

高炉内の実層厚(炉腹部位で 300~350mm)における最適配置条件提示のために、実層厚還元試験を実施した(図 3-56)。フェロコークスを使用していないベース条件は、ガスの還元ポテンシャルが高い焼結層下層の還元率は高く、上層の還元率が低かった(図 3-57)。

一方、フェロコークスを鉱石層に均一に混合した場合は、層内全域の焼結鉱還元率が全体的に向上した。フェロコークスを偏在させると、フェロコークスを混合した部位の焼結鉱の還元率が向上した。焼結鉱の層全体の平均還元率は、何れの水準もベース条件よりも焼結鉱還元率は 15% 程度高位であったが、特にフェロコークスを焼結層内に均一、或いは下層に混合した場合に高位であった(図 3-58)。

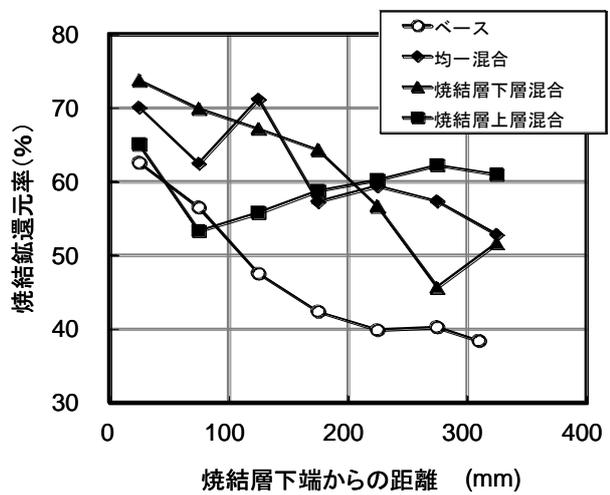


図 3-57 実層厚還元試験での還元率分布

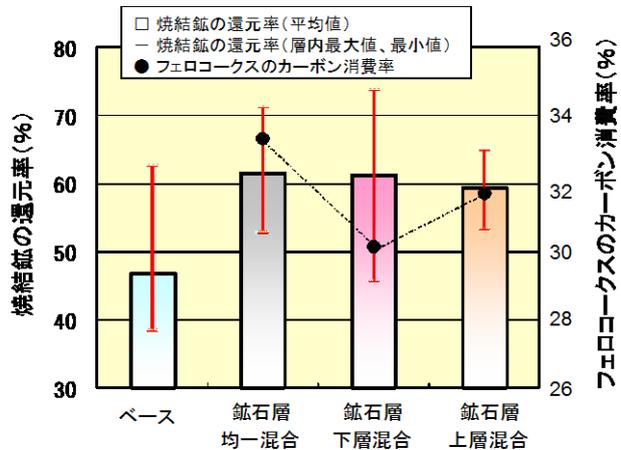


図 3-58 実層厚還元試験での焼結鉱還元率

③-1-2 高炉内反応効率改善のための操業条件の適正化

フェロコックス使用時焼結鉱の具備すべき気孔構造や内部融液発生条件について還元試験や、計算状態図、還元過程の観察などによる解析を実施した。

気孔構造の異なる試料を1000→1200℃への昇温還元実験(5℃/min, 30%CO-70%N₂混合ガス, FeO→Fe段階)に供し、還元挙動と気孔構造の関係を、融液生成による微細気孔率の変化と共に解析した(図3-59)。貫通気孔のないベース試料は、微細気孔のみから成り、微細気孔は融液生成により温度の上

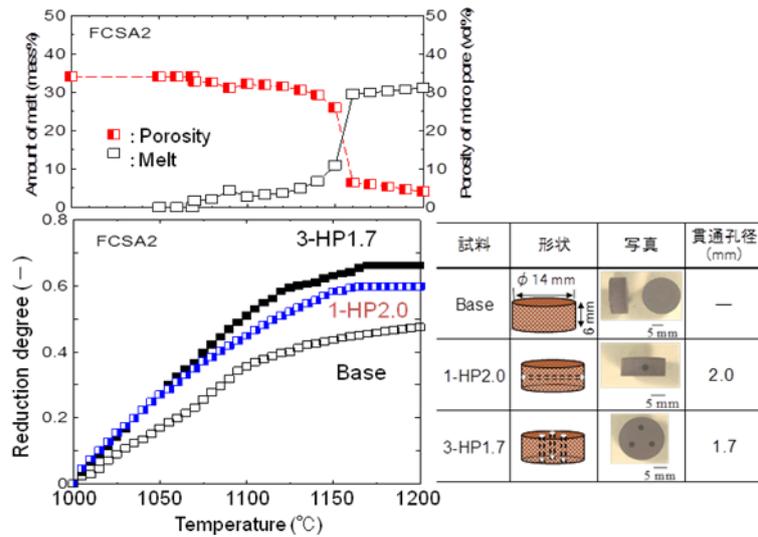


図3-59 被還元性に及ぼす融液生成量と微細気孔閉塞率の関係 (FCSA2, 5℃/min)

昇とともに減少すると推定される。還元速度も1120℃付近からゆっくり低下し、1160℃以上では還元停滞が見られた。一方、貫通気孔を含有する試料の最終還元率は約1.3~1.5倍高く、貫通気孔は軟化融着帯温度域においても被還元性向上に効果的であることが分かった。

熱力学平衡計算を用いて、高FeOスラグ域の融液生成挙動に及ぼす温度、塩基度(CaO/SiO₂)ならびにAl₂O₃およびMgO含有量などの影響を推算した(図3-60)。実機焼結鉱成分((a)FCSA2M1)ならびに鉄鉱石劣質化を考慮した成分((b)FCSA4M1)の計算結果は、1%MgO添加により初期融液生成温度はCaO/SiO₂ = 0.5でほんの少し低温側に移行し、C/S ≥ 1.5でほんの少し高温側に移行す

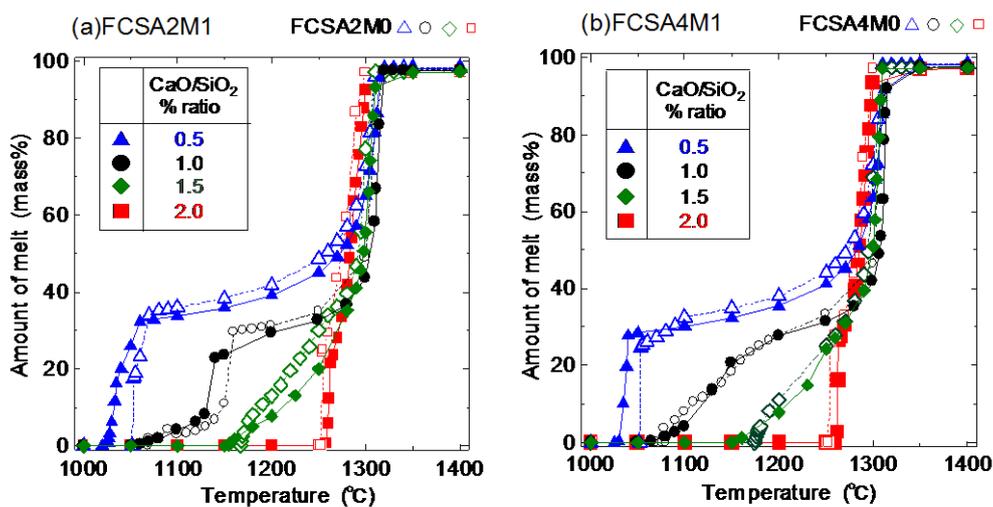


図3-60 (a), (b) 融液生成挙動に及ぼすAl₂O₃とMgO同時添加の影響(熱力学平衡計算)

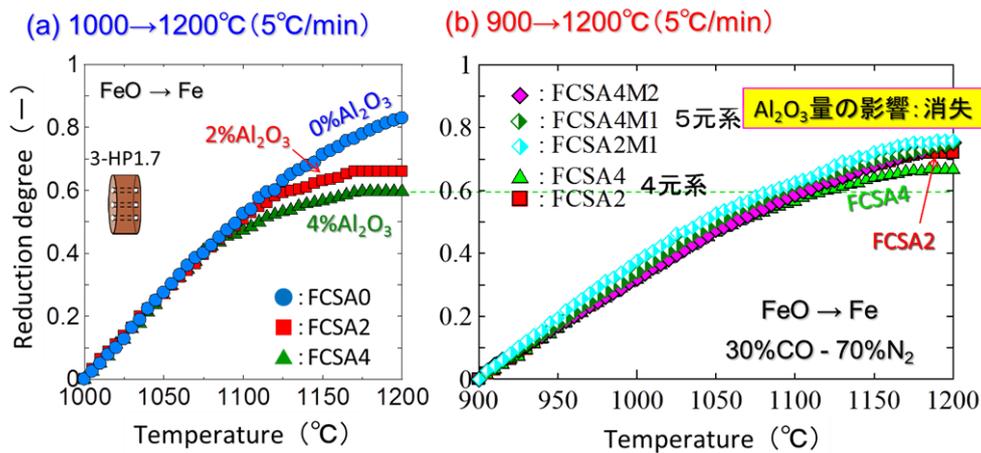


図 3-61 被還元性に及ぼす Al₂O₃, MgO 含有量の影響と熱保存帯低温化の効果

る結果を得た。また、FCSA2M1 と FCSA4M1 の比較から Al₂O₃ 含有量が現行焼結鉱の倍の 4%に増加しても、液相生成挙動は大きく変化せず、MgO が共存することにより融液生成に及ぼす Al₂O₃ の悪影響は殆ど無くなることが分かった。これより、低温側での初期融液生成を抑制するためには、スラグの塩基度 (CaO)/(SiO₂) を高く、Al₂O₃ 含有量を低下させ、MgO 含有量を増加させることが有効であると推察された。

フェロコークス使用により熱保存帯温度が低下する。その焼結鉱還元への影響を検討した。FeO → Fe 段階の還元実験を、900°C (フェロコークス使用) あるいは 1000°C (現行の熱保存帯温度上限) から 1200°C へ昇温速度 5°C/min で 30%CO-70%N₂ 混合ガスを用いて行い、1000°C から軟化融着帯温度域における模擬塊成鉱の被還元性に及ぼす融液生成挙動への成分の影響を検討した (図 3-61)。Al₂O₃ を 4% 含有する FCSA4 試料は、1000°C からの還元において、未還元 FeO を含む融液が生成し、還元停滞を呈した (図(a))。

一方、フェロコークス使用により熱保存帯が低下した場合を想定した 900°C からの還元では、Al₂O₃ の悪影響が緩和された (図(b))。さらに、MgO を添加した FCSAM 5 元系試料も 900°C からの還元では高い被還元性を示した。熱保存帯低温化による 900°C から 1200°C の高温帯での昇温被還元性が向上した要因は、還元初期段階が全域反応になったためと推定された (図 3-62)。

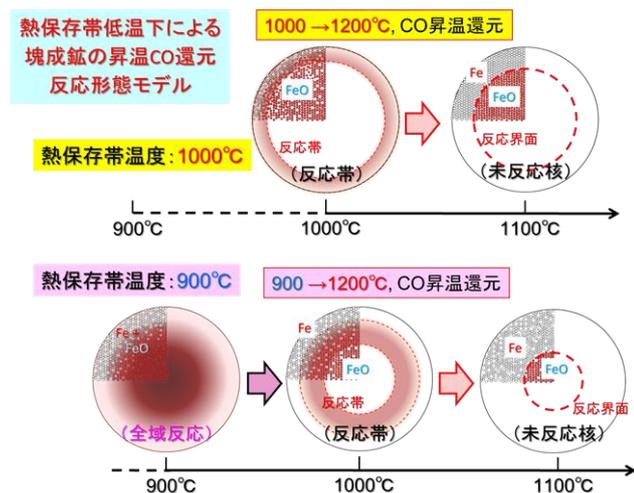


図 3-62 塊成鉱の昇温 CO 還元反応形態に及ぼす熱保存帯温度の影響

③-1-3 フェロコークスの反応モデル構築

従来のコークスと比較して、より低温からガス化を開始し、かつガス化速度の速いフェロコークスを高炉炉内に装入することにより、高炉内の熱保存帯温度が低下する。熱保存帯温度の低下に伴い、FeO-Fe 平衡を与える CO-CO₂ ガス組成が高 CO₂ 濃度側に移動する。すなわち、ガスの利用効率が上昇し、還元材比の削減が可能となる。しかし、フェロコークスのガス化挙動に関しては不明な点が多く、フェロコークスの装入方法や装入量に関する定量的な議論を行うには、フェロコークスのガス化挙動を詳細に把握する必要がある。そこで、フェロコークスのガス化挙動に及ぼす温度、ガス分圧、炭材種の影響を調査した。ラボで作製されたフェロコークス (Coke A, Coke B, Coke C)、パイロットプラントで製造されたフェロコークス (Coke D, Coke E)、および従来コークス (Coke F) を使用し、図 3-63 に示す、高炉炉内条件を想定したガス分圧下において、各コークスのガス化反応実験を行った。

Coke A~Coke C に関しては、ガス化速度におよぼす鉍石配合量の影響についても調査した。1000°C における、Coke C のガス化率曲線を図 3-64 に示すが、鉍石の配合量が多いほど、高いガス化率が得られており、Fe がコークスのガス化に対して触媒作用を示すことを確認した。また、全ての温度において、パイロットプラントで製造されたフェロコークス (Coke D, Coke E) のガス化速度が、室炉コークス (Coke F) のガス化速度より大きいことを確認した。

フェロコークスは多孔質であるため、固-気反応の解析に一般的に使用されている未反応核モデルを、フェロコークスの反応解析に使用することは困難である。そこで、フェロコークスの反応挙動を表現可能、かつ高炉数学モデルに適用可能な反応モデルとして Thiele modulus を使用したモデルを採用し、モデルの構築に必要なパラメータ (Thiele modulus m 、反応速度定数 k 、有効係数 E_f) を求めた。Thiele modulus m は、ガス化反応速度と、拡散速度の比に対応する無次元数であり、 m が小さいほど、均一反応的な反応形態となる。 E_f は反応速度の実測値と $m \rightarrow 0$ の時の反応速度の比である。実験結果の解析から、鉍石配合量の増加および温度の上昇に伴い m が大きくなることが確認されたが、何れの条件下においても $m < 10$ であり、フェロコークスのガス化が、均一反応的に進行していることを確認した。また、パイロットプラントで製造したフェロコークス (Coke D, Coke E) の $E_f \cdot k$ は、ガス分圧によらずほぼ同程度の値となることも確認した。パイロットプラントで製造されたフェロコークス (Coke D, Coke E) および室炉コークス (Coke F) の

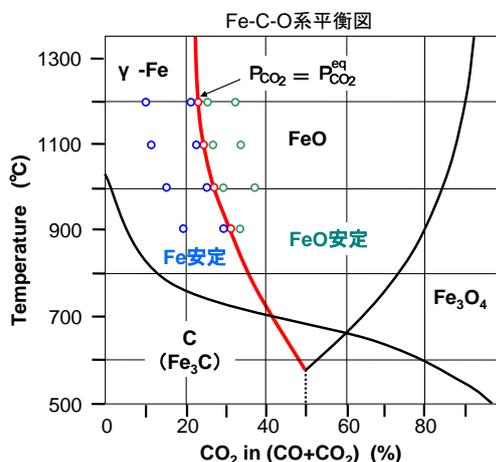


図 3-63 実験温度と実験ガス分圧

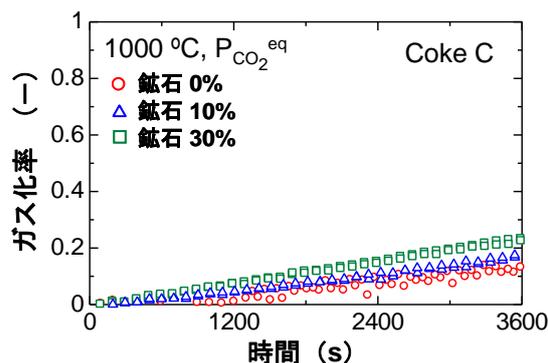


図 3-64 ガス化率におよぼす鉍石配合量の影響

$E_f \cdot k$ の温度依存性を図 3-65 に示すが、パイロットプラントで製造されたフェロコークスは、高炉コークスより低温でガス化し易いこと、 $E_f \cdot k$ は Arrhenius 型の温度依存性を示すことが分かった。

図 3-66 に示した Arrhenius プロットより、パイロットプラントで製造されたフェロコークス (Coke D, Coke E) および室炉コークス (Coke F) に関して、高炉数学モデルに適用可能な、以下のガス化速度式を得た。

Coke D: $E_f \cdot k = 9.501 \times 10^5 \exp(-141.6 \times 10^3 / RT)$

Coke E: $E_f \cdot k = 1.215 \times 10^6 \exp(-145.3 \times 10^3 / RT)$

Coke F: $E_f \cdot k = 4.314 \times 10^7 \exp(-206.0 \times 10^3 / RT)$

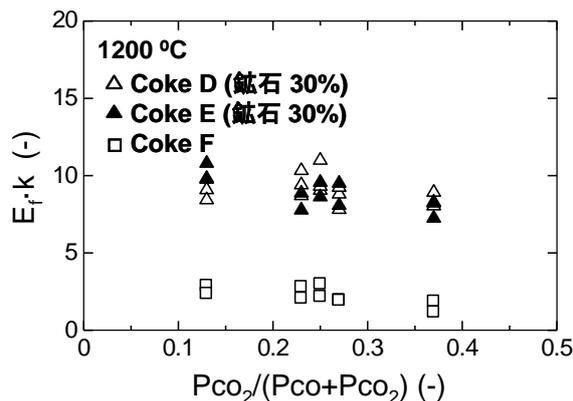


図 3-65 $E_f \cdot k$ とガス分圧の関係

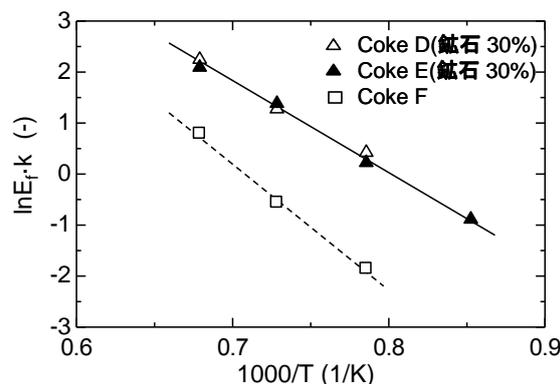


図 3-66 $E_f \cdot k$ の温度依存性

③-1-4 フェロコークスの高炉数学モデル構築

高炉数学モデルは、気相・固相・液相に対する運動量・物質・エネルギーの各収支式からなる連立微分方程式を解くことにより、3相の温度分布、流動状態、組成分布を3次的にかつ同時に把握可能なモデルである。このモデルは実高炉データによる精度検証を踏まえ、実高炉の操業状態を高精度かつ忠実に再現することが可能である。従来の高炉数学モデルでは、固相として、焼結鉱およびコークスを取り扱うことが出来るが、フェロコークス装入時の高炉炉内状況を表現するために、従来の高炉数学モデルにフェロコークスの反応モデルを組み込むとともに、フェロコークスの粒径、反応率、組成等の状態を保持するための状態変数を追加し、高炉の半径方向のフェロコークスの適正配置・配合率に関する評価機能を有する高炉数学モデルを構築した。

表 3-12 フェロコークス装入時の操業諸元

	基準操業	フェロコークス 100kg/t 使用
η_{CO} (%)	49.2	49.5
炉頂温度 (°C)	232	217
コークス比 (kg/t)	415	333
フェロコークス比 (kg/t)	0	100
微粉炭比 (kg/t)	104	104
炭素原単位 (kg/t)	451	439

十分な反応速度を有し、高炉操業を行う上で十分な強度を有している、鉱石の配合割合が 30% のフェロコックスを対象として解析を実施した。フェロコックスの装入量は 100kg/t 相当とした。フェロコックスの成分として、C、Fe、Ash を考慮した。フェロコックスの炉内反応は、主反応である、ガス化反応 ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$, $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) を考慮した。半径方向の分布は均一と仮定し、1次元にて解析を実施した。基準操業時(フェロコックスなし)の解析結果およびフェロコックス 100kg/t 装入時の解析結果を図 3-67 に示すが、フェロコックスの装入に伴う熱保存帯温度の低下が確認された。表 3-12 に操業諸元を示すが、フェロコックスの装入により炭素原単位が、12kg/t (2.66%) 低下することを確認した。

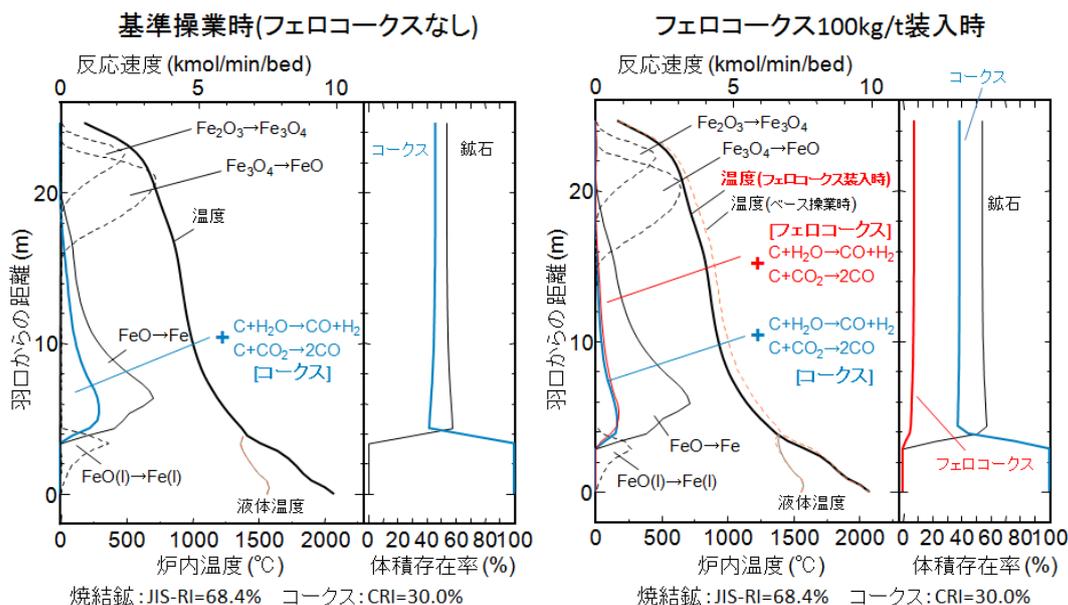


図 3-67 フェロコックスの装入に伴う炉内状況の変化

高炉数学モデルの計算精度の検証を目的として、ラボにて作製されたフェロコックス (Coke B) およびパイロットプラントで製造されたフェロコックス (Coke E) を使用して、高炉炉内条件下における荷重軟化滴下試験を実施した。フェロコックスの使用を想定した、高炉数学モデルによる計算結果および荷重軟化滴下試験結果との比較を図 3-68 に示すが、高炉数学モデルによる計算値と荷重軟化滴下試験による実験値は非常に良く一致しており、フェロコックスの反応モデルを統合した高炉数学モデルによる計算結果の妥当性が確認されるとともに、高炉炉内においても、パイロットプラントにて製造されたフェロコックスは、ラボにて作製されたフェロコックスと同様の反応挙動を示すことが確認された。

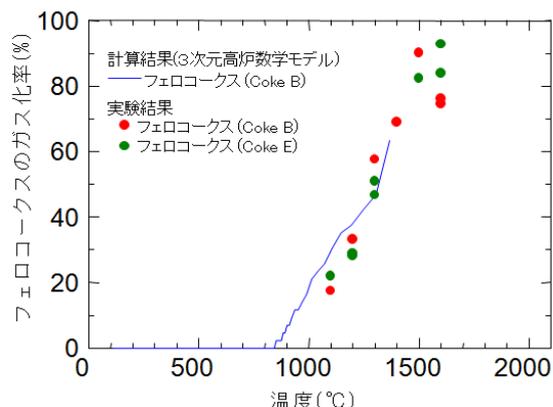


図 3-68 高炉数学モデルによる計算結果と荷重軟化滴下試験結果の比較

③-1-5 高炉数学モデルによるフェロコークスの最適配置条件の提示

(1) 最適配合量に関する検討

コークスのガス化反応は、非常に大きな吸熱反応であるため、フェロコークスのガス化に伴い、熱保存帯温度が低下する。熱保存帯温度の低下に伴い、Fe-FeO 平衡を与える CO-CO₂ 組成は CO₂ ガス濃度の高い方向にシフトするため、炉頂の CO ガス利用率の上昇が期待される。しかし、一般的に、熱保存帯温度の低下に伴い、鉱石および焼結鉱の被還元性は低下するため、フェロコークスの配合量には最適値が存在すると考えられる。そこで、フェロコークスの装入量を 0kg/t~100kg/t

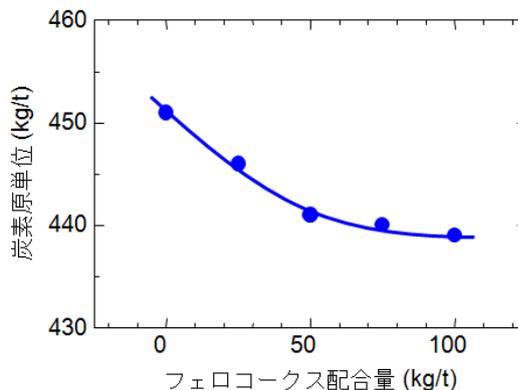


図 3-69 炭素原単位におよぼすフェロコークス配合量の影響

と変化させた際の、炭素原単位および還元材比について、高炉数学モデルによる計算・検討を行った。半径方向の装入物分布の影響を排除するため、解析は 1 次元で行った。炭素原単位におよぼすフェロコークス配合量の影響を図 3-69 に示すが、フェロコークスの配合量が 50kg/t 以下の条件下においては、フェロコークス配合量の増加に伴い炭素原単位がほぼ直線的に減少する結果となった。これに対して、フェロコークスの配合量が 50kg/t を超える条件下において、フェロコークスの配合量の増加に伴う炭素原単位の減少が確認されるが、減少の割合がやや低下する傾向にあることを確認した。これは、熱保存帯温度の低下に伴う焼結鉱の被還元性の低下が原因であり、高炉において、50kg/t を超える多量のフェロコークスを使用し、更なる還元材比の低減を指向する際には、焼結鉱の被還元性の向上が必要であると考えられる。

(2) 最適配置に関する検討

焼結鉱の還元促進効果、熱保存帯温度の低下に伴う CO ガス利用率の向上が期待されるため、フェロコークスは、焼結鉱等と混合して鉱石層に装入する事が望ましいと考えられる。すなわち、フェロコークスの高反応性を最大限に活用し、高炉の還元効率を上昇させるには、フェロコークスの配置が最適となるような装入物分布を形成する必要があると考えられる。そこで、フェロコークスの分布が還元材比におよぼす影響について検討するため、2次元解析を行った。装入物分布モデルにより、鉱石層中におけるフェロコークス

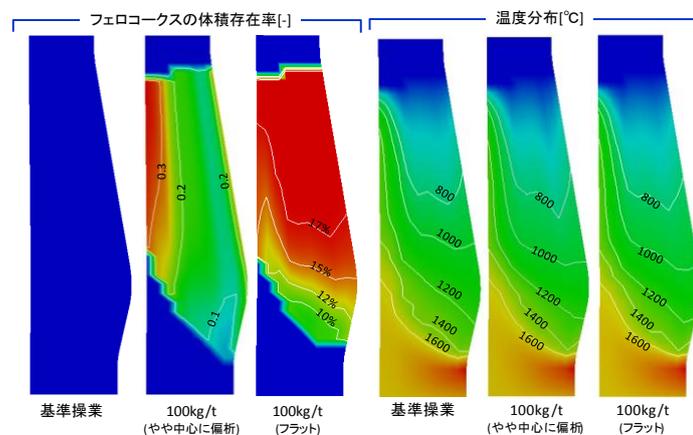


図 3-70 高炉炉内状況におよぼす、フェロコークスの分布の影響

の分布状況について検討を行った結果、フェロコークスを100kg/t 装入した場合、密度偏析・粒度偏析の影響により、フェロコークスは高炉のやや中心側に多く存在する結果となった。そこで、焼結鉱・塊鉱石等の鉱石に対して、フェロコークスのバンカー排出パターンが完全にフラット化された理想的な混合状態を想定し、高炉炉内状況および炭素原単位等およびフェロコークスの影響について検討を行った(図3-70)。その結果、フェロコークスの排出パターンをフラット化し、鉱石に対する

表 3-13 還元材比におよぼすフェロコークスの配置、焼結鉱の被還元性の影響

	フェロコークス100kg/t使用		
	やや中心側に偏析	フェロコークス/鉱石比一定	フェロコークス/鉱石比一定 高被還元性焼結使用
JIS-RI(%)	64.1	64.1	83.4
コークス比(kg/t)	305	302	263
フェロコークス(kg/t)	110	100	100
微粉炭比(kg/t)	155	154	154
還元材比(kg/t)	537	526	487

フェロコークスの比率が半径方向で一定となる分布を作り込むことにより、フェロコークスがやや中心に偏析した場合と比較して、還元材比が11kg/t 削減される結果となった(表3-13)。被還元性焼結鉱使用時の結果を表3-13に合わせて示しているが、更に、フェロコークスの非常に高いガス化反応性を有効に活用するには、フェロコークスのガス化反応性の向上と合わせて、焼結鉱の被還元性の向上が必要であると考えられた。

(3) 焼結鉱の被還元性の影響

フェロコークスを多量に高炉内に装入し、高炉の還元材比の削減を図るには、フェロコークスの粒度および密度を考慮した装入物分布の最適化と合わせて、炉内鉄原料の大部分を占める、焼結鉱の被還元性の向上が必要であると考えられる。そこで、焼結鉱の被還元性が高炉の還元材比におよぼす影響について、高炉数学モデルによる検討を実施した。結果を図3-71に示すが、焼結鉱の被還元性の向上に伴い、還元材比が低下しており、多量のフェロコークスを装入し還元材比の低下を指向する際には、焼結鉱の被還元性の向上が有効であることが分かる。焼結鉱の被還元性指数をベース操作条件時(JIS-RI=64.1%)の約1.5倍程度に向上させることにより、還元材比が基準操作時における503kg/t から476kg/tに低下、すなわち還元材比を27kg/t 低減できる可能性があるとの試算結果を得た。

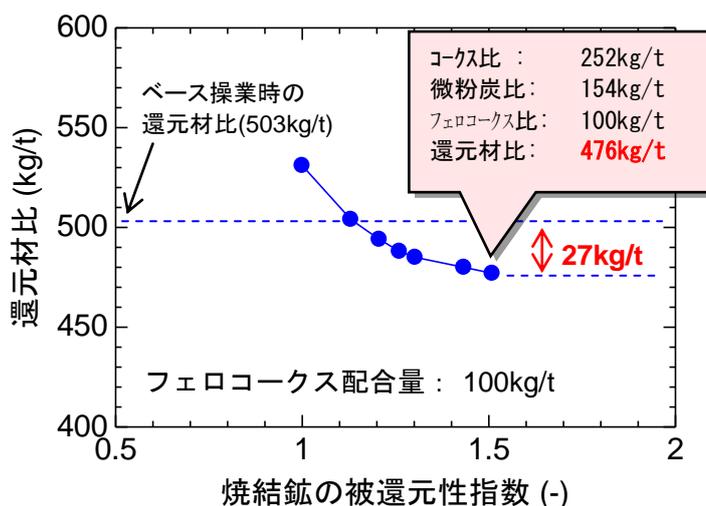


図 3-71 還元材比におよぼす焼結鉱の被還元性の影響

③-2 高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化

高炉装入シミュレーターを使用したフェロコークスの装入技術および高炉内評価技術を開発し、高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化を図ることを目的に、検討を実施した。高炉装入シミュレーターによる装入実験やDEM 計算を実施し、フェロコークスの物性（密度や粒度）を考慮した装入方法の提示を目指した。

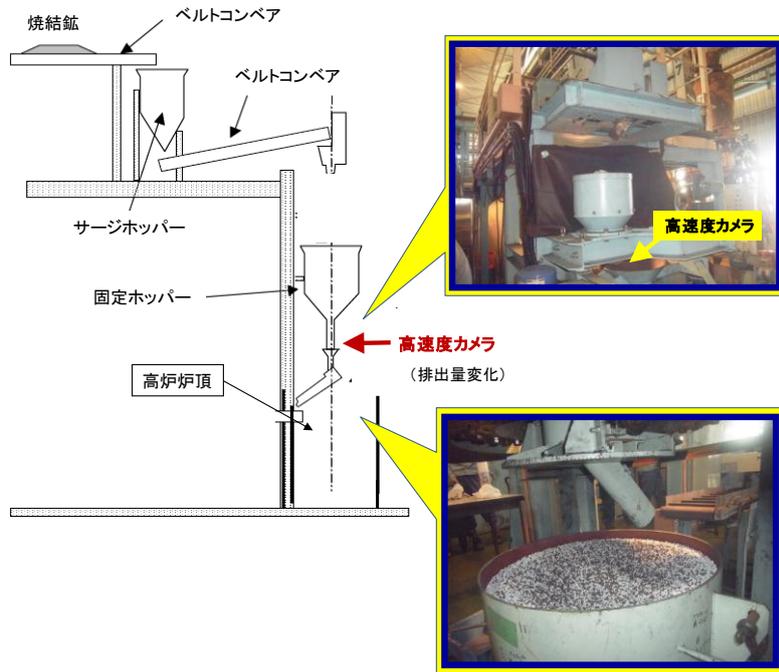


図 3-72 1/20 スケール高炉装入試験装の模式図と写真

実炉の 1/20 スケールの装入物分布試験装置（図 3-72）を用いて、高炉への搬送時、炉内装入時における密度偏析と粒度偏析の影響を検討した。

フェロコークスの固定ホッパーからの排出量は時間とともに増加傾向にあり、排出末期に大きなピークを持った（図 3-73）。粒子径が焼結鉱よりも小さい時（2-3.3mm）は、ピークとなる幅が非常に狭くなる。これは、粒子径が小さいために偏析が弱くなっているためである。

フェロコークスの粒子径が 2-3.3 mm（粒子径比：0.796）の条件においては、半径方向の偏析が抑制され、フェロコークスを高炉で有効に活用できるのではないかと考えられる（図 3-74）。一方、焼結鉱よりも粒

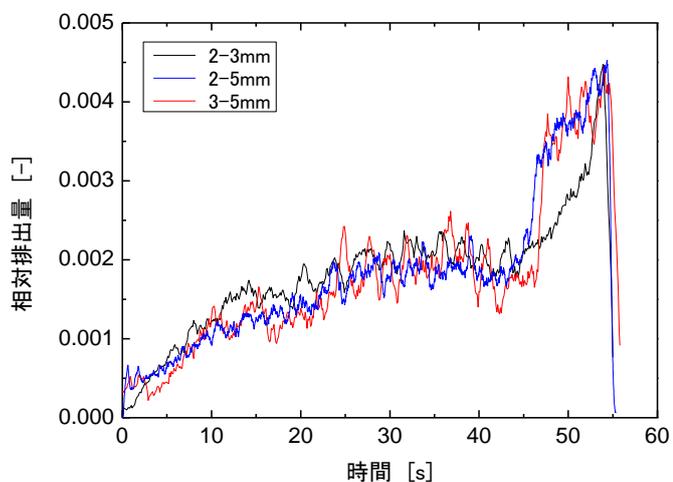


図 3-73 固定ホッパーから排出されたフェロコークスの相対量と時間の関係

子径が大きい条件である 2-5 mm と 3.3-5 mm の条件では、中心に近づくに従って混合比が増加していることがわかり、フェロコークスが中心に偏析していると言える。従って、フェロコークスを鉱石層に混ぜて高炉使用するには、粒子径を焼結鉱よりも小さく設定することが、炉内均一配置には非常に重要であると考えられる。

DEM (Discrete Element Method, 離散要素法) を用いたシミュレーションにより、高炉を模擬した幅 6 m の粒子充填斜面に焼結鉱とフェロコークス粒子を 5.0 m/s で落下させ、堆積層流動時の偏析について検討し、完全混合するための粒子条件を探索した。焼結鉱は粒子径: 30 mm、密度: 3300 kg/m³ とし、一方、フェロコークスは粒子径: 25 ~ 37.5 mm、密度: 1540 kg/m³ とし、焼結鉱に対して体積比 0.2 となるように発生させた。各領域における偏析指数 SI を算出した。SI が 1.0 よりも小さい位置では、投入混合量に比べて、混合率が小さくなっていることを示し、逆に 1.0 以上であれば、混合量よりも多くなっていることを表す。

粒子径: 25 ~ 37.5 mm における偏析指数 SI と相対流動距離の関係から、落下位置から約 8 割の範囲までは、投入時の混合比率に比べて少ない割合になっていることが確認でき、それよりも下の斜面では、フェロコークスが著しく偏析をして、ほぼフェロコークスのみの状態であることが分かった (図 3-75)。また、粒子径: 27 mm (粒子径比: 0.9) では、SI がほぼ 1.0 に近く、フェロコークスが焼結鉱と混合状態で堆積していることがわかる。従って、本 DEM の結果からフェロコークスを炉内半径方向に、より均一に混合させるためには、実験を実施した粒子径よりもやや大きい 0.9 程度が最適と思われる。

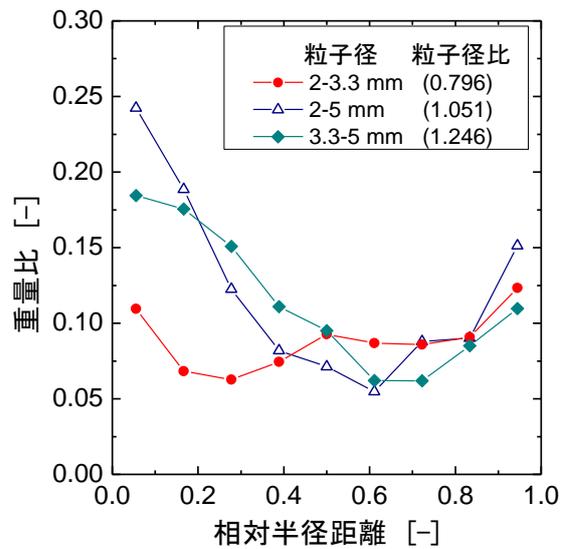


図 3-74 フェロコークスの混合比の炉内半径方向分布に及ぼすフェロコークス粒子径の影響

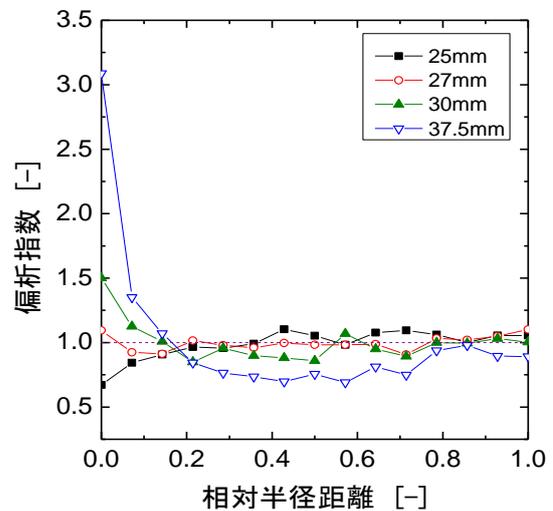


図 3-75 粒子径: 25 ~ 37.5 mm における偏析指数 SI と相対流動距離の関係

3-1-3 特許出願状況等

本プロジェクトの開発期間を通じて投稿された論文は 16 報、国際会議などでの発表は 43 報に及び、その他新聞・雑誌にも数多く掲載紹介された。成果の特許出願を含むこれらのリストを表 3-14~18 に示す。

表 3-14 論文投稿リスト

NO.	掲載年度	著者	題目	発表年月	掲載雑誌、年、ページ
1	H21	S. Ueda, K. Watanabe, K. Yanagiya, R. Inoue and T. Ariyama	Improvement of Reactivity of Carbon Iron Ore Composite with Biomass Char for Blast Furnace	2009年10月	<i>ISIJ Int.</i> 49 (2009), pp. 1505-1512
2	H21	藤本英和, 佐藤道貴	Development of Production of High Reactivity Coke - Development of Carbon Iron	2009年12月	日本エネルギー学会誌, 89 (2010), 21-27
3	H21	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	2009年12月	鉄と鋼, 95 (2009), pp. 813-820
4	H22	K. Watanabe, S. Ueda, R. Inoue and T. Ariyama	Enhancement of Reactivity of Carbon Iron Ore Composite Using Redox Reaction of Iron Oxide Powder	2010年4月	<i>ISIJ Int.</i> 50 (2010), pp. 524-530
5	H22	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	2010年9月	鉄と鋼, 96 (2010), pp. 683-690
6	H22	山崎義昭, 林崎秀幸, 上岡健太, 平木健一, 松下洋介, 青木秀之, 三浦隆利	鉄鉱石の配合によるコークスの微視構造変化が鉄内装型コークスの引張強度に及ぼす影響	2010年9月	鉄と鋼, 96 (2010), pp. 536-544
7	H22	川端弘俊, 小野英樹, 小西宏和, 碓井 建夫, 山村仁, 田村文, 内藤誠章, 西村恒久, 樋口謙一, 国友和也	模擬鉄鉱石の融液生成挙動の熱力学平衡計算とその場観察による評価	2010年9月	実験力学, Vol. 10 (2010), pp. 278-283
8	H22	S. Nomura, K. Higuchi, K. Kunitomo, M. Naito	Reaction behavior of Formed Iron Coke and Its Effect on Decreasing Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace	2010年10月	<i>ISIJ Int.</i> 50 (2010), pp. 1388-1395.
9	H23	K. Takeda, T. Anyashiki, T. Sato, N. Oyama, S. Watanabe, M. Sato	Recent Developments and Mid- and Long-Term CO2 Mitigation Projects in Ironmaking	2011年5月	<i>Steel Res Int.</i> 82 (2011), pp. 512-520
10	H23	Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, Z. Xiaoqing, Y. Matsushita, M. Shoji, H. Aoki, T. Miura	The Effect of Metallic Iron Particle on Coke-Matrix after Coke CO2 Gasification Reaction	2011年7月	<i>Journal of Thermal Science and Technology.</i> 6-2 (2011), pp. 278-288
11	H23	K. Higuchi, S. Nomura, K. Kunitomo, H. Yokoyama and M. Naito	Enhancement of Low-temperature Gasification and Reduction by Using Iron Coke in Laboratory Scale Tests	2011年8月	<i>ISIJ Int.</i> 51 (2011), pp. 1308-1315
12	H23	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	フェロコークス製造プロセスの開発	2011年9月	鉄と鋼, 97 (2011), pp. 501-509
13	H24	昆竜矢, 小島克利, 夏井俊悟, 植田滋, 井上亮, 有山達郎	冷間モデルと離散要素法を用いた堅型乾留炉内粒子の降下挙動解析	2012年9月	鉄と鋼, 98 (2012), pp. 459-468
14	H24	樋口謙一, 野村誠治, 国友和也, 横山浩一, 内藤誠章	フェロコークスによる低温度域でのガス化、還元反応の促進	2012年10月	鉄と鋼, 98 (2012), pp. 517-525
15	H24	A. Uchida, T. Kanai, Y. Yamazaki, K. Hiraki, Y. Saito, H. Aoki, N. Komatsu, N. Okuyama, M. Hamaguchi	Quantitative Evaluation of Coke Strength Index on Ferro-coke with Hyper coal Addition	投稿中	<i>ISIJ Int.</i>
16	H24	A. Uchida, Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, Y. Saito, H. Aoki, T. Inoue, N. Kikuchi, N. Komatsu, N. Okuyama, M. Hamaguchi	Evaluation on Thermoplastic Properties of HPC with Iron Oxide Addition during Thermoplastic Range	投稿中	<i>ISIJ Int.</i>

表 3-15 新聞・雑誌リスト

No.	年度	発表新聞・雑誌先	発表題目	年月日	発表者（機関）
1	H21	日刊工業新聞	環境対応技術マスコミ見学会：フェロコークスの実用化	2009年7月15日	J F E スチール（株）
2	H21	日本経済新聞	環境対応技術マスコミ見学会：新原料15年度実用化	2009年7月15日	J F E スチール（株）
3	H21	産業新聞	環境対応技術マスコミ見学会：J F E 実用化に注力	2009年7月15日	J F E スチール（株）
4	H21	化学工業日報	新製鋼原料の開発着手	2009年7月17日	J F E スチール（株）
5	H21	日刊自動車新聞	新コークスで燃焼効率化 2015実用化へ開発分担	2009年7月18日	J F E スチール（株）
6	H21	フジサンケイビジネスアイ	CO2削減 鉄鋼の革命	2009年7月27日	J F E スチール（株）
7	H21	月刊エネルギー（サカイ）	資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発	2009年10月7日	J F E スチール（株）
8	H21	エコプロダクツ2009	CO2排出抑制と低品位製鉄原料の利用拡大技術	2009年12月10日	J F E スチール（株）
9	H21	NEDO省エネフォーラム2009	革新的製鉄プロセスの先導的研究	2009年12月4日	J F E、新日鐵、住金、日新
10	H21	新聞社各社（プレスリリース）	革新的塊成物「フェロコークス」製造のためのパイロットプラント建設について	2009年12月13日	J F E スチール（株）
11	H21	時事通信	J F E スチール新原料製造の試験プラント建設	2009年12月14日	J F E スチール（株）
12	H21	鉄鋼通信	J F E スチール「フェロコークス」製造のパイロットプラント建設	2009年12月14日	J F E スチール（株）
13	H21	日経産業新聞	鉄鋼新原料「フェロコークス」	2009年12月15日	J F E スチール（株）
14	H21	日刊工業新聞	CO2排出抑えるコークス 試験プラント建設	2009年12月15日	J F E スチール（株）
15	H21	読売新聞	CO2削減へ実験設備	2009年12月15日	J F E スチール（株）
16	H21	鉄鋼新聞	フェロコークス試験製造設備 J F E、京浜に建設	2009年12月15日	J F E スチール（株）
17	H21	産経新聞	フェロコークス パイロットプラント建設	2009年12月15日	J F E スチール（株）
18	H21	共同工業	フェロコークスのパイロットプラント、東日本製鉄所に建設へ	2009年12月15日	J F E スチール（株）
19	H21	日刊建設産業新聞	設備工事に約35億円 パイロットプラント建設	2009年12月15日	J F E スチール（株）
20	H21	建設通信新聞	フェロコークスでパイロットプラント	2009年12月15日	J F E スチール（株）
21	H23	産業新聞	スチール研究所見学会開く	2011年12月1日	J F E スチール（株）
22	H23	日本経済新聞	CO2減らせる試作設備	2011年12月1日	J F E スチール（株）
23	H23	日経産業新聞	CO2削減へ鉄鋼新原料 J F E が試作設備稼働	2011年12月1日	J F E スチール（株）
24	H23	フジサンケイビジネスアイ	J F E コストもCO2も大幅削減 高品質原料の代替技術確立	2011年12月1日	J F E スチール（株）
25	H23	鉄鋼新聞	新高炉原料「フェロコークス」 試験設備が本格稼働	2011年12月1日	J F E スチール（株）
26	H23	日刊工業新聞	新原料「フェロコークス」 川崎の試験工場完成	2011年12月1日	J F E スチール（株）
27	H23	産経新聞	フェロコークス実証設備が稼働 年度内に製造技術	2011年12月1日	J F E スチール（株）
28	H23	鉄鋼通信	「フェロコークス」製造パイロットプラントが完成、稼働	2011年12月1日	J F E スチール（株）
29	H23	日本金属通信	「フェロコークス」パイロット設備が稼働	2011年12月1日	J F E スチール（株）
30	H23	化学工業日報	フェロコークスパイロット設備が稼働 13年春に製造技術確立	2011年12月1日	J F E スチール（株）

表 3-16 口頭発表リスト

No.	年度	発表先	発表題目	年月日	発表者
1	H21	日本鉄鋼協会第158回秋季講演大会	革新的製鉄プロセスの先導的研究 -フェロコークス製造プロセスの開発-	2009年9月16日	庵屋敷孝忠、藤本英和、角広行、山本哲也、武田幹治
2	H21	日本鉄鋼協会第158回秋季講演大会	革新的新塊成物による高炉熱保存帯温度低減効果	2009年9月16日	野村誠治、樋口謙一、国友和也、内藤誠章
3	H21	日本鉄鋼協会第158回秋季講演大会	鉱石を主体とする革新的塊成物の反応特性と高炉使用効果	2009年9月16日	樋口謙一、野村誠治、国友和也、内藤誠章
4	H21	日本鉄鋼協会 CAMP-ISIJ, Vol. 22, No. 2 (2009), pp. 718-721	塊成鉱の被還元性と高温性状に及ぼす気孔構造の影響	2009年9月16日	川端弘俊、碓井建夫、小西宏和、小野英樹、岩城陽三、内藤誠章、西村恒久、樋口謙一
5	H21	日本鉄鋼協会 第158回秋季講演大会	革新的塊成物の反応特性と総合数学モデル	2009年9月16日	西岡浩樹
6	H21	日本鉄鋼協会 第158回秋季講演大会	炭材内装鉱の粒内併発反応モデルを用いた高炉操業シミュレーション	2009年9月16日	埜上洋、植田滋、渡辺健太郎、井上亮、有山達郎
7	H21	日本鉄鋼協会 第158回秋季講演大会	超微粒酸化鉄外装による炭材内装鉱の還元加速	2009年9月15日	渡辺健太郎、柳谷和成、植田滋、井上亮、有山達郎
8	H21	第5回世界製鉄会議	Development of Carbon Iron Composite Process- R&D and Preparatory Research on Innovative Iron-making Process	2009年10月19日	H. Sumi, T. Yamamoto, H. Fujimoto, T. Sato, T. Anyashiki, M. Sato, K. Takeda
9	H21	高温学会、平成21年度秋季総合学術講演会、H21/12/7 (2009), pp. 48-49	塊成鉱の高温性状に及ぼす融液生成ならびに貫通孔の影響	2009年12月7日	表 宏樹、川端弘俊、小西宏和、小野英樹、碓井建夫、岩城陽三、内藤誠章、西村恒久
10	H21	International Symposium on Ironmaking for Sustainable Development, Osaka, Japan (January, 2010), pp. 41-44	Effect of Pore Structure of Agglomerates on Reduction Behaviors and High Temperature Properties	2010年1月28日	T. Nishimura, T. Usui, H. Kawabata, H. Konishi, H. Ono, Y. Iwaki, M. Naito, K. Higuchi
11	H21	クリーンコールセミナー広島 (J c o a l)	鉄鋼を支える石炭	2010年3月1日	川田 仁
12	H21	第13回化学工学会学生発表会(秋田大会)研究発表講演要旨集, 秋田 主催: 化学工学会東北支部	石炭粒径による微視構造の変化が新規バインダーを配合した鉄内装型コークスの強度に及ぼす影響	2010年3月5日	内田中、金井鉄也、山崎義昭、平木健一、張曉晴、庄子正和、青木秀之、三浦隆利、濱口真基、小松信行
13	H22	第3回日豪中シンポジウム	Recent developments and mid- and long-term CO2 mitigation project in ironmaking	2010年7月26日	K. Takeda, T. Anyashiki, T. Sato, N. Oyama, S. Watakabe, M. Sato
14	H22	Global COE Summer School, Sendai, Japan	A Design Guideline of High Strength Ferrous Coke	2010年8月20日	Y. Yamazaki, .Hiraki, T. Kanai, A. Uchida, M. Shoji, H. Aoki, T. Miura
15	H22	Global COE Student's Workshop, Sendai, Japan	A Control of Coke-lump Gasification Reaction Mechanism with Catalyst Particle	2010年8月20日	Y. Yamazaki
16	H22	日本鉄鋼協会 第160回秋季講演大会	軟化融着帯温度域における模擬塊成鉱の被還元性に及ぼす融液生成挙動の影響と貫通孔の効果	2010年9月25日	川端弘俊、小野英樹、小西宏和、樋口謙一、国友和也
17	H22	日本鉄鋼協会 第160回秋季講演大会	離散要素法による壱型乾留炉内の固体降下挙動	2010年9月25日	小島克利、夏井俊悟、植田滋、井上亮、有山達郎
18	H22	日本鉄鋼協会 第160回秋季講演大会	フェロコークスの高炉内配置条件が還元効率に及ぼす影響	2010年9月25日	横山浩一、国友和也、樋口謙一、野村誠治
19	H22	The 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Istanbul, TURKEY 主催: Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh	An Experimental Study on the Effect of Metallic Iron Particles on Strength Factors of Coke after CO2 Gasification Reaction	2010年10月11日 ~14日	山崎義昭、平木健一、金井鉄也、張曉晴、松下洋介、庄子正和、青木秀之、三浦隆利
20	H22	The 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Istanbul, TURKEY	An Experimental Study on the Effect of Metallic Iron Particles on Strength Factors of Coke after CO2 Gasification Reaction	2010年10月14日	Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, X. Zhang, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, X. Zhang, A. Uchida,

No.	年度	発表先	発表題目	年月日	発表者
21	H22	The Seventh International Conference on Flow Dynamics	The Effect of Metallic Iron Catalyst on Coke Microscopic factor after Coke Gasification	2010年11月3日	Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, X. Zhang, A. Uchida, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura
22	H23	第11回日本伝熱学会学生発表会講演論文集, 15-16, 宮城 主催: 東北大学	HPCの配合が鉄内装型コークスの強度に及ぼす影響	2011年5月6日	内田中, 金井鉄也, 山崎義昭, 平木健一, 張曉清, 齋藤泰洋, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利, 濱口眞基, 小松信行,
23	H23	日本鉄鋼協会 第162回秋季講演大会	高反応性コークスのCO-CO2混合ガスによる反応速度解析	2011年9月22日	中村知弘, 大野光一郎, 前田敬之, 西岡浩樹, 清水正賢
24	H23	日本鉄鋼協会 第162回秋季講演大会	フェロコークス製造プロセスの開発	2011年9月20日~22日	藤本英和, 角広行, 佐藤健, 庵屋敷孝思, 佐藤秀明
25	H23	日本鉄鋼協会 第162回秋季講演大会	高炉模擬塊成鉱の昇温還元挙動に及ぼす融液生成の影響と貫通孔の効果	2011年9月20日~22日	松田 航尚, 小西 宏和, 小野英樹, 川端 弘俊
26	H23	8th International Conference on Flow Dynamics, 498-499, Sendai, Japan 主催: Tohoku University	Quantitative Evaluation of Relationship between Coke Strength and Microstructure of Ferro-coke with HPC addition	2011年11月9日	A. Uchida, T. Kanai, Y. Yamazaki, K. Hiraki, Z. Xiaoping, Y. Saito, H. Aoki, T. Miura, N. Okuyama, N. Komatsu, M. Hamaguchi
27	H23	日本鉄鋼協会 第5回学生鉄鋼セミナー、製鉄コース	高炉模擬塊成鉱の昇温還元挙動に及ぼす融液生成の影響と貫通孔の効果	2011年11月	松田 航尚,
28	H23	2012 International on CO2 Reduction in Steel Industry	For the Innovation of Ironmaking by Partnership on Environment	2012年1月20日	JFE, 新日鐵, 住金, 神鋼, 東北大, 大阪大, 九大
29	H23	日本鉄鋼協会 第163回春季講演大会	フェロコークス製造プロセスの開発	2012年3月28日	角広行, 藤本英和, 佐藤健, 庵屋敷孝思, 濱口眞基, 小松信行
30	H23	日本鉄鋼協会 第163回春季講演大会	CO-CO2混合ガス中での高反応性コークスの反応速度に及ぼす炭種の影響	2012年3月28日	中村知弘, 大野光一郎, 前田敬之, 西岡浩樹, 清水正賢
31	H24	館記念シンポジウム	資源対応力強化のための革新的製鉄原料-東大試験高炉から30年目の再挑戦-	2012年4月28日	武田幹治
32	H24	日本鉄鋼協会 第164回秋季講演大会	フェロコークスの高炉内配置条件が還元効率に及ぼす影響-2-	2012年9月19日	横山浩一, 野村誠治, 樋口謙一, 国友和也
33	H24	日本鉄鋼協会 第164回秋季講演大会	高炉操業におよぼすフェロコークス配合量の影響	2012年9月19日	西岡浩樹, 松倉良徳, 宇治澤優
34	H24	日本鉄鋼協会 第164回秋季講演大会	FCSAM 5元系模擬塊成鉱の昇温還元挙動に及ぼす初期融液生成の影響	2012年9月17日	松田航尚, 小西宏和, 小野英樹, 川端弘俊, 竹内栄一, 樋口謙一, 国友和也
35	H24	日本鉄鋼協会 第164回秋季講演大会	離散要素法を用いた堅型乾留炉内スケールアップ時の固体流れ解析	2012年9月17日	昆竜矢 夏井俊悟 植田滋 井上亮 有山達郎
36	H24	9th European Conference on Coal Research and its Applications	The Evaluation on Thermoplastic Properties of HPC with Oxide Iron Addition during Thermoplastic Zone	2012年9月10日	内田中, 山崎義昭, 平木健一, 金井鉄也, 齋藤泰洋, 青木秀之, 井上聡則, 菊池直樹, 奥山憲幸, 濱口眞基
37	H24	第6回世界製鉄会議	PILOT PLANT SCALE DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE IRONMAKING PROCESS FOR USAGE OF LOW GRADED RAW MATERIALS AND CO2 MITIGATION	2012年10月14日	K. Takeda, H. Sato, T. Anyashiki, T. Sato, H. Fujimoto, H. Sumi, A. Watanabe, M. Sato, K. Higuchi, M. Hamaguchi, Y. Ujisawa
38	H24	学術振興会 第148委員会、第54委員会 合同委員会	(石炭溶剤抽出物) ハイパーコールの利用技術開発	2012年12月6日	濱口眞基
39	H24	日本鉄鋼協会 第165回春季講演大会	FeO-CaO-SiO2-Al2O3-MgO 5元系模擬塊成鉱の昇温被還元性に及ぼすフェロコークスの効果	2013年3月27日	川端弘俊, 松田航尚, 小西宏和, 小野英樹, 竹内栄一, 樋口謙一
40	H24	日本鉄鋼協会 第165回春季講演大会	還元効率を考慮したフェロコークスの高炉内配置条件と装入方法	2013年3月27日	横山浩一, 三尾浩, 樋口謙一
41	H24	日本鉄鋼協会 第165回春季講演大会	フェロコークスによる高炉還元材比低減	2013年3月27日	西岡浩樹, 宇治澤優
42	H24	日本鉄鋼協会 第165回春季講演大会	酸化鉄がHPCの溶融特性に及ぼす影響の検討	2013年3月27日	内田中, 山崎 義昭, 外石安佑子, 松尾翔平, 齋藤泰洋, 青木 秀之, 央戸貴洋, 奥山憲幸, 濱口眞基
43	H24	日本鉄鋼協会 第165回春季講演大会	フェロコークス製造プロセスの開発	2013年3月28日	藤本英和, 角広行, 佐藤健, 庵屋敷孝思, 佐藤秀明

表 3-17 特許・論文等件数

論文	新聞・雑誌	発表	特許
16	30	43	17

3-2 目標の達成度

表 3-18 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①フェロコークスの組成・構造条件の探索			
①-1 実験室規模小型成型試験での試作とフェロコークスの物性評価	小型成型試験機を用い適正成型条件を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・攪拌混合時の速度、温度、時間等の影響因子を調査し、成型歩留りと成型後強度を確保できる均一攪拌技術を確立した。 ・フェロコークス同士の融着の有無を確認するとともにI型強度試験機、荷重軟化試験装置を用いてフェロコークスが目標とする強度と反応性を有することを確認した。 	達成
①-2 成型設備(30t/d)の開発	成型設備を完成し設備の操業技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・成型、乾留一貫操業技術の確立に向けた成型設備の操業技術を確立した。 	達成
①-3 成型物強度向上のためのバインダー探索	新規バインダーを数種類試作し、新規バインダーの性状・配合量と成型物強度の関係を明確にする。	<ul style="list-style-type: none"> ・ベンチスケールで製造した新規バインダー2種類のベンチ成型試験を実施し、ASP代替の可能性を見出した。 	達成
②フェロコークスの製造プロセスの開発			
②-1 実験室規模での適正乾留条件探索	実験室規模の電気抵抗加熱乾留炉を用いた実験結果より、適正操業条件を決定する。	<ul style="list-style-type: none"> ・実験室規模炉での炉内温度勾配を変更した実験に基づき、強度、反応性の観点から最適操業条件を決定した。 	達成
②-2 30t/d規模パイロット型乾留炉の設計	②-1の研究成果を基に直接加熱方式による連続型乾留炉の設計を完了する	<ul style="list-style-type: none"> ・複数羽口へのガス温度・流量などの制御技術を基本とする循環ガス加熱システムを構築した。 ・排ガスからのタール除去、排ガス/循環ガスからのコーキング抑制方法を開発した。 ・金属鉄の再酸化を防止する乾式排出システムを構築した。 ・循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉の設計を実施した。 	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
②-3 30t/d 規模パイロット型乾留炉の建設と実証	循環ガス加熱によるパイロット型乾留炉での適正製造条件を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・成型、乾留一貫システムの運転、操業技術を確立するとともに、30t/d の製造能力を実証した ・品質向上を目指すため炉頂、各羽口の循環ガス量、温度などの最適操業条件を確立した 	達成
②-4 長期製造試験と品質評価	長期製造試験により、安定製造技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・原料の水分、粒度などの操業変動に対応する技術を構築し、長期連続操業を実施した。 ・設備の一部の解体調査（混練機の攪拌羽根、成型機のロール、乾留炉耐火物、製品排出装置など）を実施し、設備劣化を定量的に評価した。 	達成
	フェロコークスの品質評価試験により、大型高炉での使用時の課題を明確化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・炉頂部のガス利用率変化など、操業要因を測定し、高炉使用時の課題を検討、明確化した。 	
②-5 型乾留炉の流動シミュレーション	離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討、原料配合設計に適用できるシミュレーションを実施する。	<ul style="list-style-type: none"> ・滞留時間分布の観点から炉の形状の最適化を図る共に、スケールアップの指針を得た。 ・排出口形状などの炉体構造影響を検討、粒子収縮など、物理性状の変化の影響を検討した。 	達成
③フェロコークスによる高炉操業プロセス開発			
③-1-1 高炉内反応平衡制御手段の提示	フェロコークスの高炉操業状況への効果が発揮されるメカニズムと効果が最大となる条件を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークスのガス化反応量と焼結鉱還元促進効果の観点から、フェロコークスは鉱石層に均一混合することが望ましいことを見出した。 	達成
	フェロコークスによる熱保存帯温度低下などの効果を定量化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークスを鉱石層に158kg/t相当を均一混合した場合、約100℃程度の熱保存帯温度低減効果と12.6kg/tの還元材比低減効果を確認した。 	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
③-1-2 高炉内反応平衡制御のための操業条件の適正化	塊成鉱の構造として最適な気孔構造など具備すべき条件を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・貫通孔が、軟化融着帯温度域においても被還元性向上に効果的であることを見出した。 ・低温域での融液生成抑制のための成分条件を明確化した。 ・熱保存帯低温化により、還元形態が変化して高温域での還元停滞性が緩和されることを見出した。 	達成
③-1-3 フェロコークスの反応モデル構築	高炉数学モデルに適用する反応モデルを構築する。	<ul style="list-style-type: none"> ・種々のフェロコークスのガス化反応速度を測定・解析した結果に基づき、高炉数学モデルに適用可能な反応モデルを構築した。 	達成
③-1-4 フェロコークスの高炉数学モデル構築	フェロコークスの配置・配合率の評価機能を有する高炉数学モデルを構築する。	<ul style="list-style-type: none"> ・上記反応モデルを統合し、フェロコークスの配置・配合率の評価機能を有する数学モデルを構築した。 	達成
③-1-5 高炉数学モデルによる実用フェロコークスの最適配置条件の提示	フェロコークスの最適配置・最適配合率を導出する。	上記高炉数学モデルを使用し、フェロコークの配置・配合率が還元材比に及ぼす影響を調査し、最適値を導出した。	達成
③-2 高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化	フェロコークスの装入技術および高炉内評価技術を開発し、高炉内反応効率改善のための炉内配置の適正化を図る。制御性と再現性に優れた最適な装入方法を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークスを炉内に混合配置するための粒度条件を明確化した。 ・上記の粒度条件では、通常の装入方法でも、最適な配置と成り得ることを見出した。 	達成

基礎的な開発である①製造条件の探索の成果に基づいて、②フェロコークス製造プロセス開発では、30t/dの成型設備、パイロット型乾留炉を設計、適正操業条件を確立して、30t/dの製造能力を実証した。また、1から7次の長期製造試験を実施し、目標である安定操業技術を確立するとともに、大型高炉への試験装入を実施し、短期間ではあるが還元材比低下などの効果を把握することができた。同時に、高炉使用時の課題が明確になり、開発方針策定のための有益な情報を得ることができた。

③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発においては、熱保存帯温度低下などのフェロコークスの効果は鉱石への混合方法により変化し、鉱石層内に均一に混合することが望ましいことが明らかになった。また、フェロコークスでの高炉使用時の効果を推定する統合モデルを構築、反応速度モデルを組み込むことにより還元材比低減効果などを定量的に評価する技術を構築することができた。フェロコークスの製造技術、高炉使用技術に関して、30t/dパイロットプラント規模での開発、一部実炉での評価、BIS炉、実層厚炉などの独自実験技術、最先端のシミュレーション技術を活用することにより、当初の目標をすべて達成することができた。

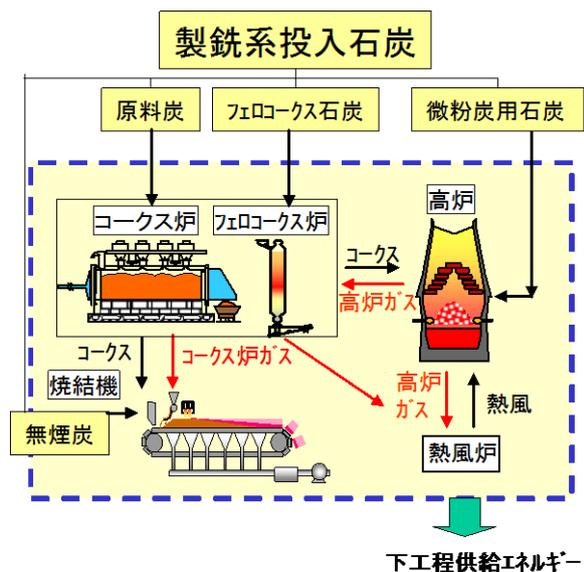


図 3-76 製鉄工程の石炭、エネルギーフロー

プロジェクト全体としては、フェロコークスを活用した高炉操業技術の開発により優れた省エネルギー特性（CO₂排出削減効果）および資源対応力を有するプロセスを実現することを長期目標としている。具体的には ○製鉄工程の投入エネルギーの約10%の削減ポテンシャル（図3-76に示す製鉄系へ投入される石炭が指標） ○コークス製造における高品位炭の利用を現状の約80%から約60%まで約20%低減して低品位炭の利用を拡大する。 ○高品位鉄鉱石の利用を現状の約60%から約57%まで約3%低減して低品位鉄鉱石の利用を拡大する。

フェロコークス使用時の還元材比の低下について千葉第6高炉（炉容積 5,153 m³）で使用試験（フェロコークス原単位 43kg/t）を行い、ほぼ当初の計画通りの還元材比低下効果を得た。試験結果に基づいてフェロコークス原単位を室炉コークスの1/3を置換するところまで外挿すると、溶銑1t 製造に必要な石炭は、ベースの約90%になり、製銑工程の投入エネルギー（製銑系に投入される石炭）の約10%の削減ポテンシャルがあることを確認できた。フェロコークスの使用量を増大するには、製造プロセスの大型化、設備、操業コストの観点からの経済性、高炉の通気性の確保、高炉炉頂温度の確保、製鉄所内での不足エネルギー対応など多くの課題が残されているが、約10%の省エネルギーポテンシャルがあることは確認できた。（図3-77 参照）

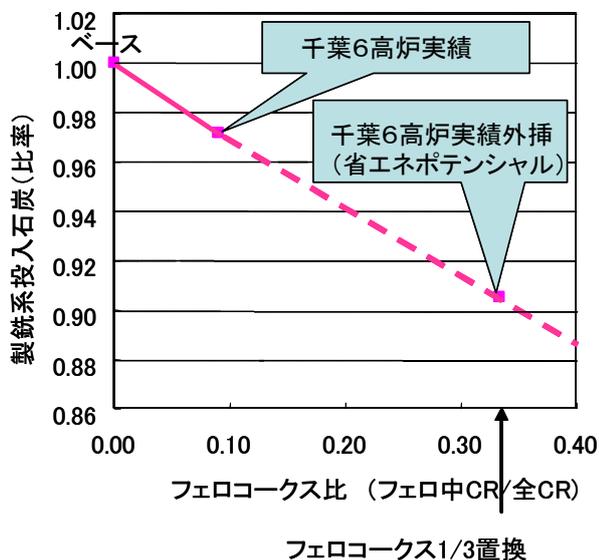


図 3-77 製銑工程の省エネポテンシャル

フェロコークスの使用により、①反応性向上によるコークス用石炭の削減、②通常コークスの必要量が低下することによりコークス用の高品位炭の削減が可能になる。現状高炉操業ではコークス用石炭の約80%は高品位炭を使用し、微粉炭用の石炭も含めて全体の60%が高品位炭となっている。フェロコークスを使用することにより石炭の使用量が約10%削減、さらに、通常コークスの使用量が低下、フェロコークスは全量低品位炭から製造することを考慮すると高品位炭の割合は34%に低下、現状使用量に対して約2割超の高品位炭の削減ポテンシャルがあることを確認できた。また、低品位の高結晶水鉍石を用いることができるため、約3%の低品位鉍石の利用拡大が可能となる。（図3-78 参照）

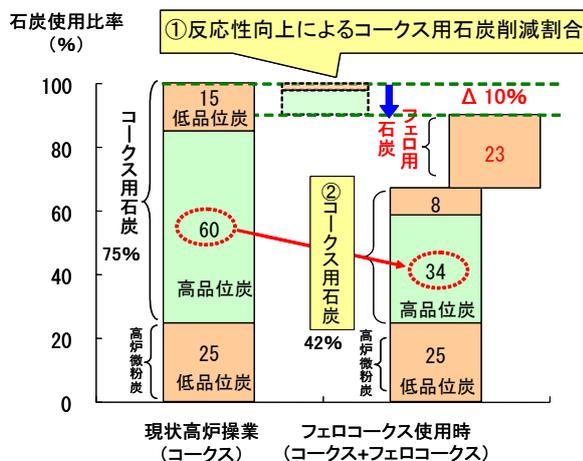


図 3-78 高品位炭の削減効果

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

(1) フェロコークスプロセスの現在の位置づけ

本プロジェクトは資源対応力強化と省エネルギー（CO2 排出抑制）を目的に 2006 年に先導的研究をスタートし、2012 年に完了するまで約 7 年間経過した。鉄鋼業を取り巻く環境は、以下に示すようにより一層厳しくなっている。

- ① リーマンショックによる市況の乱高下を経て、高品位石炭、鉄鉱石の価格は高止まりとなっており、資源対応力という観点では安価、劣質原料使用技術に対するニーズは高い。
- ② 老朽コークス炉の一部更新が進んでいるとはいうものの図 4-1 に示したように国内のコークス炉の老朽化が進んでいる。コークス炉の寿命を 50 年と想定すると、2025 年には大部分のコークス炉が更新時期を迎え、新技術に対するニーズは確実に増大している。
- ③ 2011 年 3 月の東日本大震災により、国内のエネルギー構造が大きく変化した。原子力発電の休止に伴い、代替の火力発電の割合が増大、LNG 価格が急騰している。フェロコークスによる製鉄系での省エネルギーは同時に製鉄所の下工程に供給できる副生ガス量を減少させるため、主たる補填エネルギーの価格が経済性を大きく左右する。また、2020 年までに 25%の二酸化炭素排出削減を目指す地球温暖化対策の見直しも必須な状況にある。これらの直近の環境変化は、フェロコークスプロセスの事業化に際しては不利となる要因である。

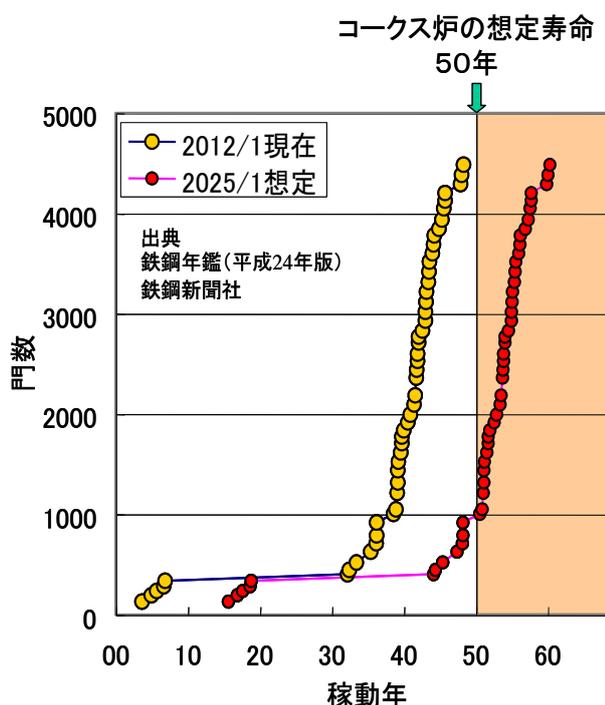


図 4-1 日本のコークス炉の稼動年数

(2) コークス炉のリプレース時期

鉄鋼業の厳しい経済環境下で、設備投資負担の軽減と更新時期の集中を防ぐため既存コークス炉の炉寿命の延長はきわめて重要な課題であり、診断、補修技術開発に取り組んでいる。しかしながら、図 4-1 に示したように、既存コークス炉の寿命を 50 年と想定する、2025 年までには多くの炉が寿命に達し、リプレースが必要となる。フェロコークスプロセスは、高反応性炭材として全体の 1/3 のコークスを置換することを目指しており、SCOPE21 を含む室炉式コークス炉への更新と並行して新規のフェロコークスプロセスの導入が期待される。

(3) フェロコークスプロセスの経済性の評価

パイロットプラント 30t/d の実績をベースに実機想定 1500t/d での製造費、および、高炉で使用時の溶銑コストの変化を試算した。なお、実機設備と概念設計をある程度の精度で行うには、さらに大きな実証設備での試験が必要なため、設備費の試算は今回の検討の対象外とした。

パイロットプラントの原料配合、各種用役原単位実績をベースに実機想定でのフェロコークス製造費を試算し、ベースの室炉との比較を行った。なお、石炭価格は市況により大きく変動するため、2012 年段階での試算である。

パイロットプラントでの実績をベースにした試算では、室炉コークス用の高品位石炭の代わりに安価な微粘炭、非粘炭、鉄鉱石を使用するため原料コストは低下する。一方、バインダーを使用、乾留、還元に必要な熱量がコストアップ要因となるが、コークス製造単価（フェロコークスの場合は鉄を含んだ単価）は約 25% 低下する。将来的には、安価な一般炭使用など更なるコスト低減が開発目標となる。

フェロコークスを高炉で使用した場合の溶銑製造費の試算を行った。千葉 6 高炉での使用試験実績をベースに各種原単位を室炉コークスをフェロコークスで 1/3 置換まで外挿した操業でのコスト試算である。安価なフェロコークスの使用と還元材比低下による必要還元材コストの低下により、溶銑製造費は低下する。製造コストの開発目標値をベースにすると 4% 強の溶銑コストの低減が試算される。この試算はあくまでも短期試験での実績を外挿したものであり、今後の精度向上のためにも実証設備での試験が必要である。

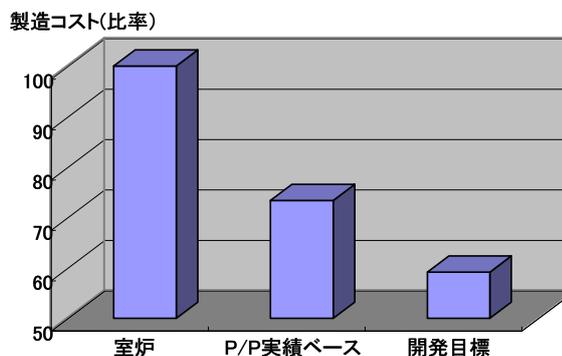


図 4-2 フェロコークス製造費試算

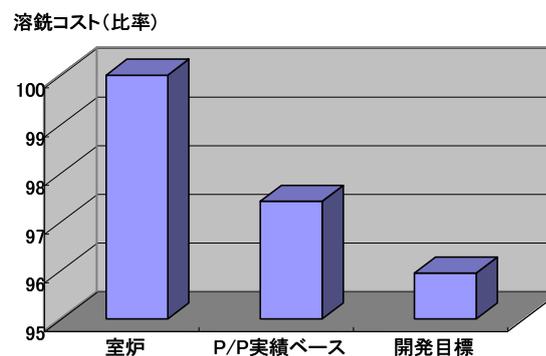


図 4-3 溶銑製造コスト試算

(4) フェロコークスプロセスの実用化にむけた課題と展開

本プロジェクトでは、30t/d パイロットプラントでの製造技術の確立、ラボ、数式モデルでの高炉操業技術開発、実高炉での評価試験と当初の目標をすべて達成し、実用化に向けた主要な課題が明確になった。表 4-1 に各要素技術から経済性評価まで主要な成果と実用化への課題を列記した。製造技術については、混練、成型、乾留の各設備のスケールアップ、高炉操業技術では

最適装入方法実現のためのハード、ソフト技術、フェロコックス配合比増大時の還元材比低減促進、通気性、炉頂温度などの操業上の課題、省エネ評価では製鉄所へ供給できる副生ガス減少への経済的なエネルギー補填方法の検討、操業コストの精度向上、実機規模プロセス設計、設備費評価が課題となっている。

表 4-1 に示した課題に取り組むには、スケールアップ技術の実証、実高炉での長期使用試験が可能な規模の中規模実証試験が必要となる。製造プロセスでは 30t/d から 10 倍の 1500t/d に拡大するのではなく、中間規模でスケールアップに関する設備、操業技術を実証する。また、本プロジェクトは 30t/d 規模で製造したフェロコックスを備蓄、5 日間という短期間の高炉使用試験を行った。高炉での還元材比低下効果などを実証するには、長期の連続使用試験が不可欠である。実用化にむけては、図 4-4 に示したように 30t/d と 1500t/d の中間に中規模実証機での開発を想定している。中規模実証機での開発には多額の設備投資と操業費がかかり、一民間企業の負担で遂行するにはリスクが高く、引き続き公的な支援が期待される。

表 4-1 主要な成果と実用化への課題

	項目	主要な成果	実用化への課題
技術課題	製造技術	30t/d 1ヶ月安定製造実証	・混練成型設備スケールアップ ・乾留炉スケールアップ
	新規バインダー	新規バインダー製造実証 強度改善確認	・実機製造設備設計 ・最適製造条件
	高炉操業技術(1)	最適混合 鉱石均一混合	・粒径に応じた最適装入方法
	高炉操業技術(2)	モデル構築 効果定量化	・高配合比時の還元材比低減促進
	高炉課題抽出	43kg/t使用による還元材比低減	・高配合時の通気、炉頂温度
実機化課題	省エネ評価	実績外挿により約10%の石炭使用量削減ポテンシャル	製鉄所供給エネルギー減への対応
	経済性評価	経済性試算 製造コスト 45%削減 溶銹コスト 4%削減	操業コスト精度向上 実機規模プロセス設計、設備費評価

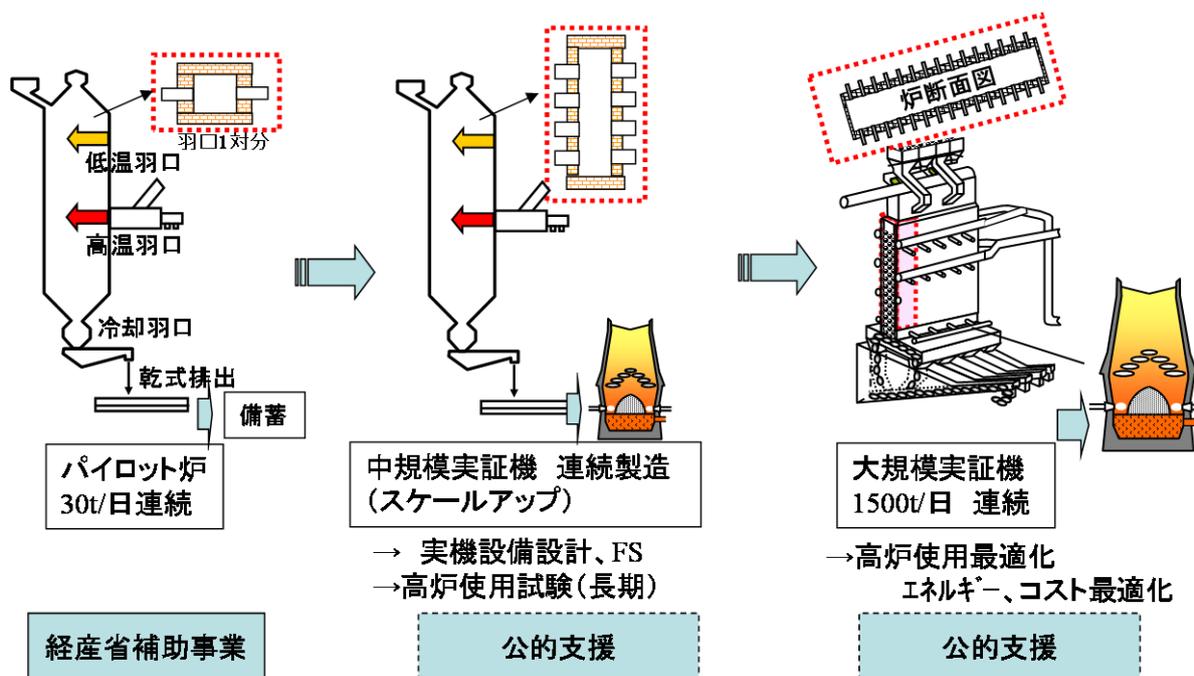


図 4-4 実用化に向けた開発ステップ

4-2 波及効果

本プロジェクトの成果は、石炭、鉱石の価格高騰に対応した資源対応力強化、二酸化炭素排出抑制を目的として、既存コークス炉のリプレイス時に展開していくのが基本であるが、関連分野への技術的、経済的波及効果、当該分野での開発力、人材育成への波及効果としては以下の点にまとめられる。

(1) 関連分野への技術的、経済的波及効果

フェロコークスプロセスは、日本発の還元材比の低減技術として、国内のみならず、欧州、韓国、中国でも着目されている技術であり、国際会議などでの発表時の反響は大きい。欧州で開発されている二酸化炭素排出削減技術 ULCOS top gas recycling blast furnace、あるいは、日本の COURSE50 プロジェクトと連携して二酸化炭素排出削減技術として世界に展開できるものと考えられる。

また、鉄鉱石、石炭の価格は山元と製鉄所との交渉により決定される。従来製鉄用として使用できない低品位炭を使用する技術を構築できたことは、実際の需給バランスの改善もさることながら、価格交渉時の切り札として貢献できる。資源価格の高騰により溶銑コストに占める原料コストの割合は年々増加しており、価格の低減は競争力確保に欠かすことができない。

(2) 当該分野の研究開発、人材育成の促進

本プロジェクトは、大学による基礎的研究としてコークス強度発現機構の解明、離散要素法 (DEM) による乾留炉の解析、塊成鉱の高温での還元特性、コークス反応速度の定量化が行われた。これは、フェロコークスに限らず製銑分野で共通した課題であり、その知見は COURSE50 など現在進行中の他のプロジェクトにも役立つ。また、構築された基盤技術は、高炉での鉱石、コークス混合装入など既存の高炉操業技術の改善に活用されていく。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発工程

図5-1に最終的な研究開発工程を示した。パイロットプラント(30t/d)でのフェロコークス製造技術の実証、大型高炉での使用試験による高炉使用時の課題抽出という最終目標に向かって、各要素技術の開発を推進した。①-3新規バインダー開発では、バインダーとしての要求特性の明確化、溶媒抽出法による製造条件の決定、少量試作、パイロットプラント成型設備での評価試験ができる100kg程度の試作を経て、パイロットプラントでの試験を実施し、新規バインダーの優位性を確認した。また、①-1、2では原料配合条件、混練時の速度、温度、成型条件など成型設備の設計に必要な条件を確立、設備設計、据付、試運転を経て成型設備の操業条件を確立した。②の乾留炉関連開発では、乾留炉の設計条件の確立、設計、製作、据付、試運転を経て、①-2で完成した成型設備との成型・乾留一貫操業技術を確立し、フェロコークスの連続製造技術を確立した。長期製造試験によりプロセスとしての信頼性を確認するとともに、製造したフェロコークスを備蓄し、大型高炉での品質評価試験を実施、還元材比の低下などのフェロコークスの効果を確認した。③高炉操業プロセス開発では、フェロコークスの混合方法(コークス、鉱石)、配置によるその効果の違いを検討し、その最適配置を実現するための装入手段の開発を実施した。また、高炉内のフェロコークスの挙動の解析、効果の評価、特に混合位置による効果の差異を定量化するため、フェロコークス反応モデル、高炉モデルを構築した。パイロットプラントで製造したフェロコークスサンプルの反応速度を測定し、数式モデル上でフェロコークスの効果を定量化した。これらの高炉操業プロセス開発技術の知見は、大型高炉での評価試験での成果、課題と連成することにより次ステップの実証炉での連続高炉試験に反映される。

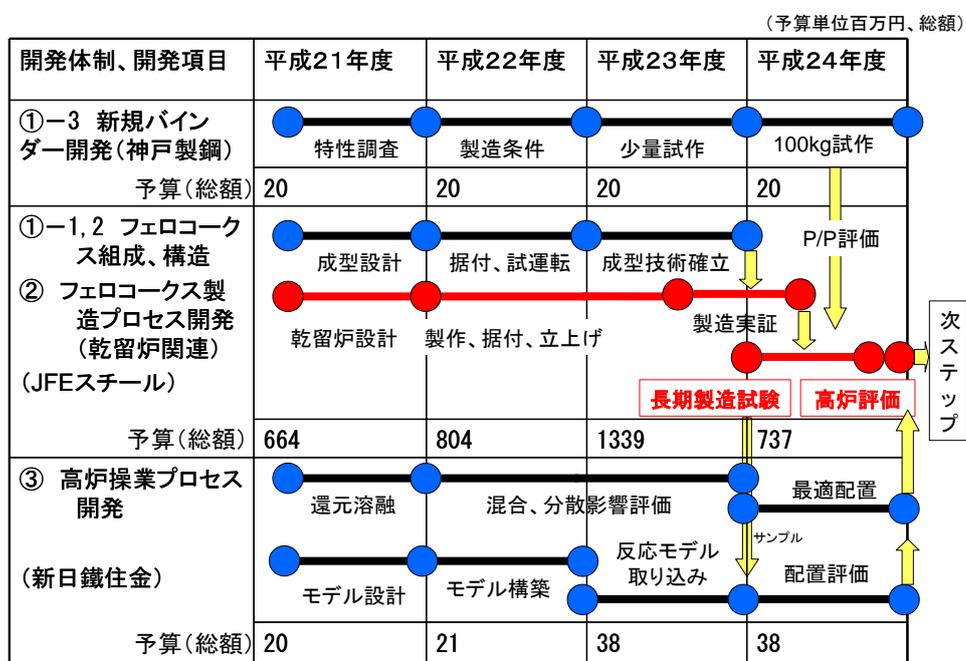


図5-1 研究開発工程連関図

パイロットプラントの製作、操業という多額の設備費を要する開発に重点的に予算を配布するとともに、設備の完成、操業が重複する平成23年度にもっとも多い予算を確保した。

当初計画との差異（要素技術開発、工程）については、5-5 変化への対応で説明する。

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本プロジェクトは、平成 21、22 年度は新エネルギー・産業技術総合開発機構の助成事業、平成 23、24 年度は図 5-2 に示すように経済産業省からの補助事業として実施された。実施 4 社からなる研究幹事会を設置し、定期的には年 4 回、必要の都度開催し、開発方針の検討、決定、進捗管理、見直しを行った。個別の研究課題は、各実施企業の既存技術、設備を考慮して分担し、基礎的な研究は関連する大学に委託されて個別に推進された。全体での研究の進捗状況の把握、技術的な討論、掘り下げを行うため、大学も含めた研究会を組織した。表 5-1 に各会議の開催実績を示したが 3 ヶ月に 1 開催し、製鉄企画室も含めて研究方針の変更、修正に反映する仕組みがとられた。

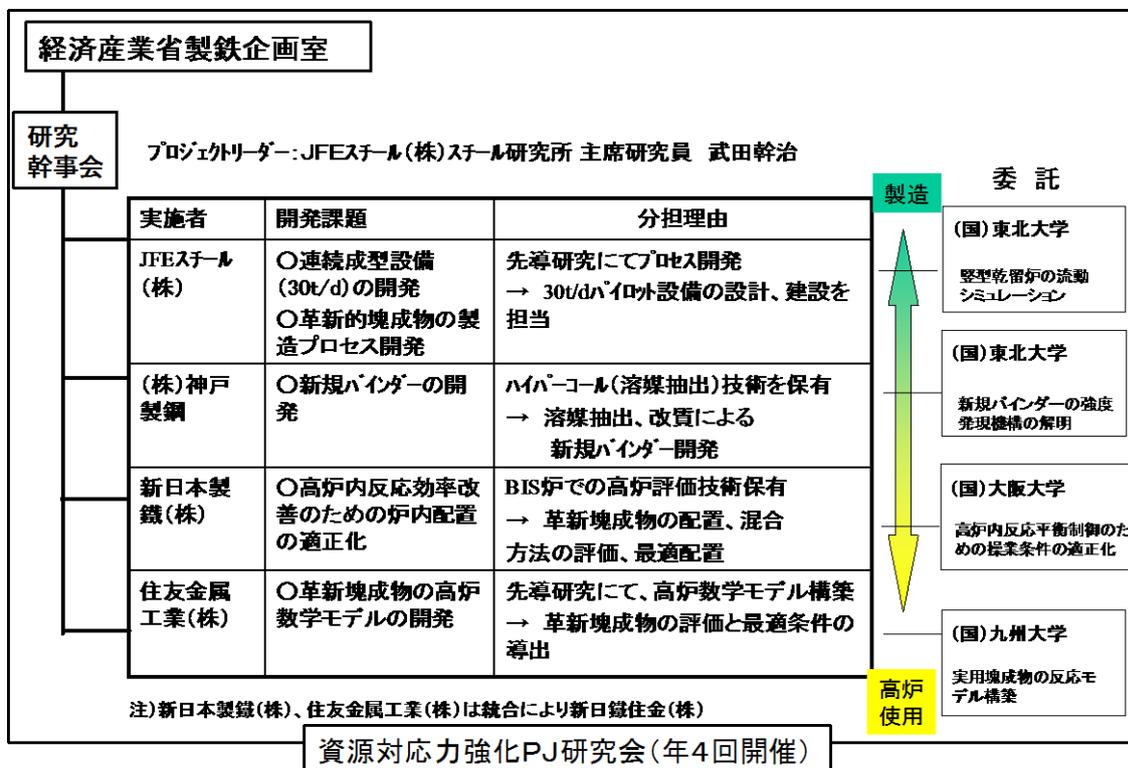


図 5-2 開発実施体制と要素技術開発担当

表 5-1 開発推進会議開催実績

会議	開催日	開催場所	備考
幹事会	2009年8月5日	JRCM	開発計画審議
第1回研究会・幹事会	2009年9月28日	JRCM	開発計画討議
幹事会	2009年11月11日	JRCM	開発予算審議、委託契約審議
第2回研究会・幹事会	2009年12月17日	JRCM	研究進捗報告と次年度計画討議
第3回研究会・幹事会	2009年2月25日	JRCM	研究進捗報告と次年度計画審議
幹事会	2010年4月16日	JRCM	予算審議、開発計画見直し
第4回研究会・幹事会	2010年5月28日	JRCM	研究進捗報告と討議
第5回研究会・幹事会	2010年9月3日	JRCM	研究進捗報告と討議
第6回研究会・幹事会	2010年12月21日	JRCM	研究進捗報告と次年度計画討議
第7回研究会・幹事会	2011年3月8日	航空会館	研究成果報告と討議
第8回研究会・幹事会	2011年7月11日	JRCM	研究進捗報告と討議
第9回研究会・幹事会	2011年9月27日	JRCM	研究進捗報告と討議
第10回研究会・幹事会	2011年12月19日	JFE京浜	研究進捗報告とパイロット見学
第11回研究会・幹事会	2012年3月12日	JRCM	研究成果報告と次年度計画審議
第12回研究会・幹事会	2012年7月6日	JRCM	研究進捗報告と討議
幹事会	2012年8月9日	JRCM	研究目標達成度審議
第13回研究会・幹事会	2012年10月5日	JRCM	研究進捗報告と討議
第14回研究会・幹事会	2012年12月14日	JRCM	研究成果報告と成果報告書作成
幹事会	2013年02月21日	JRCM	目標達成度審議と成果報告書
第15回研究会・幹事会	2013年03月18日	JRCM	4年間の研究成果報告
幹事会	2013年05月31日	JRCM	成果報告書と今後の対応討議

5-3 資金配分

フェロコークスの製造プロセスの開発（成形技術開発、乾留技術開発）に全体の95%を使用し、フェロコークス用の新規バインダーの開発（①-3）に2%、フェロコークス高炉内反応効率改善のための炉内配置適正化に2%、フェロコークス高炉数学モデル開発に1%を使用した。

主要な技術開発である製造プロセスの開発に重点的に予算を配分することにより、パイロット規模 30t/d という比較的大きな規模での設備、操業技術開発を推進し、所期の成果を上げることが出来た。

表 5-3 資金度配分（補助金申請ベース）

（単位：百万円）

年度 平成	2 1	2 2	2 3	2 4	合計
資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発技術開発 ①フェロコークスの組成・構造条件の探索 ②フェロコークスの製造プロセスの開発 ③フェロコークスによる高炉操業プロセスの開発					
（JFE） ① -1, 2：塊成物の試作、評価、成形設備（30t/d）の開発 ②：フェロコークス乾留炉（30t/d）の適正乾留条件探索・設計・建設・実証	332	402	670	369	1,772
（神鋼） ① -3：フェロコークス強度向上のためのバインダー開発	10	11	12	12	44
（新日鐵住金（富津）） ③-1 フェロコークス高炉内反応効率改善のための炉内配置適正化	8	9	13	15	44
（新日鐵住金（波崎）） ③-2 フェロコークス高炉数学モデル開発	2	2	6	3	14
合計	352	424	700	399	1,875

5-4 費用対効果

<費用>

18.7億円（補助金額、補助率：1/2）

	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
予算（億円）	3.5	4.2	7.0	4.0

※平成21、22年度はNEDO、平成23、24年度は経済産業省

<効果>

本事業の目的の一つとして、フェロコークスの活用を通じた資源対応力強化が挙げられる。

昨今の原料調達について、原料炭の輸入は全体の7割が豪州から、また、鉄鉱石は全体の9割を豪州（6割）、ブラジル（約3割）の2カ国からの輸入で占めている。原料サプライヤーも寡占体制となっており、鉄鋼メーカー等買い手の価格交渉力が低下し、従来は年単位の価格改定交渉だったものが、四半期毎の改定となっている。

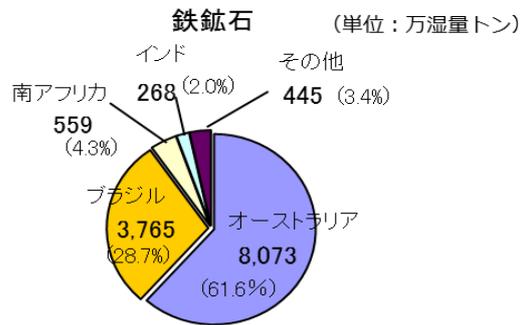
現に、原料価格のグローバルなボラティリティの高さと、最終的な製品への価格転嫁の困難性により、鉄鋼業の収益基盤に影響を与えている。

このような中、当技術を活用しフェロコークスを使用することになれば反応性が向上するので、現状の高炉操業の石炭総投入量を100とした場合、石炭総投入量が100から90へ減少する。内訳は低品位炭が40から56に増加し、高品位炭が60から34へ減少する。仮に国内の平均的なコークス炉1基をフェロコークス導入タイプに切り替える場合、原料炭輸入量および高品位原料炭と低品位原料炭の全国平均単価を元に試算すると約40億円の原料炭コストが低減されることになる。また、鉄鉱石についても、比率は小さいものの、低品位の鉄鉱石の割合を増加することが可能となるため、少なからず石炭同様、費用低減等の効果が得られる。

直接的な原料コスト低減効果に加えて、調達出来る地域が偏在している高品位炭から多様な地域から調達出来る低品位炭の調達割合が増えれば、価格交渉力の点でも有利となる可能性がある。

省エネルギーという観点でも、溶銑1t製造に必要な石炭が、約90%になり、製銑工程の投入エネルギーの約10%削減の削減ポテンシャルがあることが確認されたことから、大きな省エネルギー効果や二酸化炭素排出量の削減にも大きく寄与する。

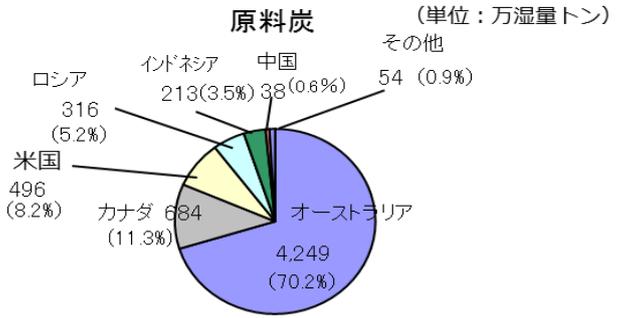
鉄鉱石の国別輸入量(2012年)



合計 13,110

(出所) 財務省貿易統計

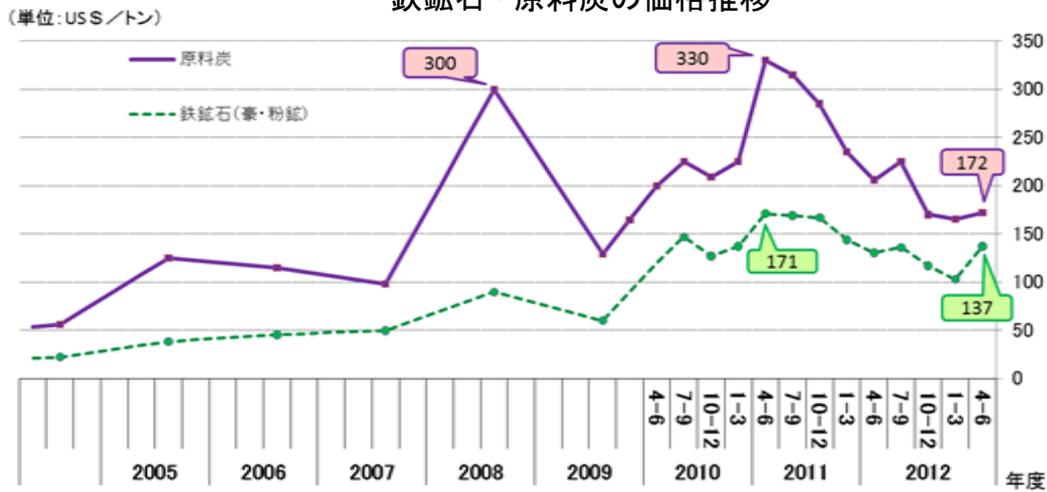
原料炭の国別輸入量(2012年)



合計 6,050

(出所) 日本鉄鋼連盟

鉄鉱石・原料炭の価格推移



出所: 報道より経済産業省作成

5 - 5 変化への対応

2009 年本事業開始以降、開発の変化としては②-3 (2) で述べた循環ガスダクトの断熱性能改善のためのダクト改造と②-4 (1) で述べた鉱石の配合比率制御向上のための設備改造が挙げられる。

ダクト改造に関しては炉本体に小塊コークスを充填し、まさに作業条件検討の着手段階で明らかとなった事項であり、当初予定の送付条件で低温羽口が目標到達温度に至らなかった。目標温度未達の原因については、解体調査の結果、配管外周部の断熱ボード間に数 mm の隙間があることが確認されたほか、循環ガス加熱器の出口から各羽口までのガスダクトの距離が長く (図 5-3)、その間で計画値以上の熱が放散され循環ガス温度が低下したものと考えられる。対応策として、耐火物の断熱性を向上させたダクトに改造し、所定の目標温度に到達したが、約 1 ヶ月の工事期間を要した。

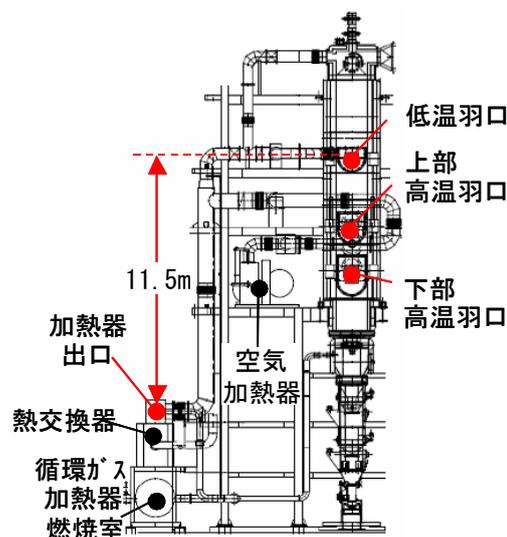


図 5-3 乾留炉立面図

鉱石ラインは第 3 次操業までの試験では、鉱石および石炭の切出し量を中間ホッパー底部の切出しコンベアおよび秤量コンベアで調整し、粉碎後石炭と鉱石をフライトコンベアで混合し、乾燥機およびサージホッパーを通して混練機へ搬送していた。しかしながら、搬送工程で偏析が起こり、成型物強度にバラツキが発生した。対応策として、鉱石と粉碎炭は混練機直前で混合するために鉱石の別送ラインを増設した。増設工事は約 2 週間を要したが、別送化によって成型物中の鉱石配合比率が安定し、強度のバラツキも抑制され平均強度の上昇を確認することができた。

開発の大きな変化として、上述した二つの改造工事が挙げられるが、その後の長期製造試験により、プロセスの安定操業技術を確立するとともに製造したフェロコークスを備蓄し、大型高炉での還元材比低減効果、課題などを検討する高炉試験を実施した。これにより、当初計画では、高炉数式モデルを用いた高炉での評価までを行い、次ステップで実高炉での効果検証を行う予定だったが、還元材比低減、通気などの影響を前倒して調査することができた。