

「環境調和型プロセス技術の開発」
②フェロコークス技術の開発」

事業原簿

【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 省エネルギー部
-----	------------------------------------------

—目次—

概要	2
プロジェクト用語集	6
I. 事業の位置付け・必要性について NEDO	9
1. 事業の背景・目的・位置付け	9
2. NEDO の関与の必要性	18
2-1 NEDO が関与することの意義	18
2-2 実施の効果	19
II. 研究開発マネジメントについて	21
1. 事業の目標	21
2. 事業の計画内容	24
2-1 事業内容	24
2-2 研究開発の実施体制	28
2-3 研究開発の運営管理	30
III. 研究開発成果について	35
1. 事業全体の成果	35
1-1 概要	35
1-2 成果概要	37
1-2-1 中間目標と達成状況及び、最終目標の達成可能性	37
1-2-2 知的財産等の成果概要	47
2. 研究開発項目毎の成果	48
IV. 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び、見通しについて	65
1. 成果の実用化・事業化に向けた戦略	65
1-1 実用化	65
1-2 事業化	65
2. 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組	65
3. 成果の実用化・事業化の見通し	66
(添付資料)	
・ プロジェクト基本計画	
・ 特許論文等リスト	

概要

		最終更新日	2020年10月20日	
プロジェクト名	環境調査型プロセス技術の開発／②フェロコークス技術の開発	プロジェクト番号	P13012	
担当推進部/ PMまたは担当者	省エネルギー部 PM氏名 田村順一（2020年10月現在） 省エネルギー部 担当者氏名 武田行生（2020年10月現在）			
0. 事業の概要	<p>(1)概要：本事業は、製鉄工程の省エネルギー化とCO2削減を図ることで、鉄鋼業における省エネルギー化、CO2削減を推進するものである。一般炭と低品位鉄鉱石を用い成型した塊成物（フェロコークス）をコークス、鉄鉱石と共に高炉へ装入することで、フェロコークス内の金属鉄を触媒として鉄鉱石の還元反応を効率的に行い、1,500t/日規模の設備で10%の省エネルギー効果を目指すものである。</p> <p>(2)事業規模：総事業費(国費分)100.6億円予定（助成率1/2以内）</p> <p>(3)事業期間：2017年度～2022年度（6年間）</p>			
1. 事業の位置 付け・必要性について	<p>鉄鋼業は我が国産業部門の中でCO2発生量の約40%、国全体の約14%を占める最大のCO2排出業種であり、その中でも製鉄工程では、その70%を占めており、製鉄工程におけるCO2削減は喫緊の課題となっている。また、日本の製鉄技術は既に世界最先端の水準にあり、廃熱や副生ガスの利用による省エネルギーも極限に達していることから、地球温暖化対策としては革新的な省CO2及び省エネルギー技術の導入が急がれている。フェロコークスは、一般炭と低品位鉄鉱石の混合成型・乾留により生成された金属鉄の触媒作用を利用して、鉄鉱石の還元を低温で行うことで還元効率を飛躍的に高めた革新的塊成物であり、これを使用することで投入するコークス量を削減できる省エネ技術開発である。</p> <p>高炉による製鉄プロセスから発生するCO2又はエネルギー消費量を抜本的に削減する本プロジェクトは、鉄鋼業における省エネ対策の最後の切り札として、2030年に最大5基の導入を目指し、未だ世界で手掛けたことのない革新的な技術開発を行うものであり、高度な技術を要すること、長期にわたること、及び巨額の設備投資を伴うため、開発リスクも大きく、民間のみでは取り組むことが困難であり、国内高炉メーカー、大学等のノウハウを結集するため、国がイニシアチブを取り、産官学のコンソーシアムを構築し、一体かつ効率的に開発を実施していく必要がある。</p>			
2. 研究開発マネジメントについて				
事業の目標	<p>【アウトプット目標】 2022年度</p> <p>(a) 中規模設備での製造技術実証</p> <p>a-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立</p> <p>a-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> 生産量300t/dで長期間安定稼動が可能なことを実証する。 高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。 混合・攪拌シミュレーションモデルを用い、均一性を確保できる運転条件を提示する。 <p>指標1：原料の均一混合技術の確立（固体3種類、液体1種類の混合）：混合度95以上</p> <p>指標2：乾留後塊成物のドラム強度：DI150/15≥80（*）</p> <p>（*）「資源対応力のための革新的製鉄プロセス技術開発」において、フェロコークス製造量27.5t/d～30t/dとし、乾留炉操業30日間で740tのフェロコークスを製造した際、目標強度DI30/15>81以上の歩留りが93.5%であった。</p> <p>(b) 一般炭、低品位原料使用時の製造技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ラボスケールでの試験結果から、原料（鉄鉱石、石炭）の絞込みを行う。これら原料がフェロコークス用原料として適していることを検証する。 <p>指標：成型物の強度（I型ドラム強度）：ID30/15≥85</p> <p>(c) 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証</p>			

・高炉への長期装入試験を行い、高炉の還元材比や高炉操業の安定性に及ぼす影響を評価する。また、製鉄工程における省エネ効果に及ぼす影響を把握し、(e)の数値シミュレーションと合わせ、目標の省エネ10%を達成する。

指標：連続操業試験：30日以上

(d) 新バインダー強度発現実証

・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。

・所定の強度を実現しうる液体新規バインダー製造プロセス案を提示する。

・フェロコクスブリケットの冷間強度予測モデルを提示する。

指標：(a)及び(b)の達成に資するものであり、指標その他は(a)、(b)と同じ

(e) フェロコクス導入効果の検証

・フェロコクスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。

・中規模設備で製造したフェロコクスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

指標：評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認

((e) の数値シミュレーションと (c) (実高炉でのフェロコクス長期使用、効果検証) の結果と合わせ、目標の省エネ10%を検証する)。

【アウトカム目標】

2030年頃までに1500トン/日規模の実機5基を導入し、溶銑製造量2,000万トン/年(400万t/年高炉5基)に対して、省エネルギー効果量として原油換算量19.4万kL/年、CO2削減量は82万t/年を見込む。また、フェロコクス原料炭の一般炭への利用拡大を進めることにより、約280億円の経済性を見込む。

事業の計画内容	主な実施事項	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	
	中規模設備の製造技術実証	設計・建設			製造・実証			
一般炭、低品位原料使用時の製造技術	原料選定・ラボ評価							
実高炉でのフェロコクス長期使用、効果検証	高炉装入検討			使用・効果検証				
新バインダー強度発現実証	製造実証				評価			
フェロコクス導入効果の検証	実験室レベルサンプル評価			中規模実証設備サンプル評価				
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	総額
	総NEDO負担額	828	2,077	2,506	2,506	779	865	9,560
開発体制	経産省担当原課	製造産業局金属課金属技術室						

	プロジェクト リーダー	技術開発責任者 JFE スチール株式会社 スチール研究所 主幹研究員 佐藤道貴
	プロジェクト マネージャー	省エネルギー部 田村 順一
	助成先等	【助成先】 JFE スチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、新日鉄住金株式会社（～2019年3月31日） 日本製鉄株式会社（2019年4月1日～） 【共同研究先】 国立大学法人東北大学、国立大学法人九州大学
情勢変化への 対応	① 事業期間変更 ② 名称変更 ③ 交付決定期間の変更 ④ コロナ禍の影響による実施内容の変更	
中間評価結果 への対応	(中間評価を実施した事業のみ)	
評価に関する 事項	事前評価	2016年度実施 担当部 省エネルギー部
	中間評価	2020年度 中間評価実施予定
	事後評価	2023年度 事後評価実施予定
3. 研究開発成果について		①中規模設備での製造技術実証については、建設を2020年9月までに完了し、計画通り10月からは100t/dの連続操業へ移行している。 ②一般炭、低品位原料使用時の製造技術は、今まで製鉄所では使いにくかった一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石2銘柄の選定を終え、今後の中規模設備での使用試験に備えていく。 ③大型高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証についても10月からの高炉での連続使用（100t/d）に向け計画通りに進行している。 ④新バインダー強度発現実証における新規固形バインダーの開発については、0.3トン/日にスケールアップした設備で製造できる目途を得るとともに、新規液体バインダーについても、フェロコークスタールの改質したバインダーを試作している。 ⑤フェロコークス導入効果の検証では一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスを用い、その高温性状を調査するとともにフェロコークス反応モデルを構築し、両者の結果を反映した汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させた。今後は高炉での使用結果とも合わせ、解析精度アップを図っていく予定である。 以上のように、中間年度（2020年度）までほぼ計画通りに進行している。最終年度までには、最終目標である、フェロコークスの連続製造、高炉使用（30日以上）を達成するとともに、汎用高機能高炉内反応シミュレーターにより、製鉄プロセスにおける省エネ 10%を検証していく予定である。併せて新規固形、液体バインダーについても工業的な製造プロセス案を提示する計画である。
	投稿論文	5件
	特許	「出願済」1件、（うち国際出願0件）
	その他の外部発表 （プレス発表等）	研究発表 14件 新聞・雑誌等への掲載 11件 展示会への出展 3件

<p>4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・中規模設備で300t/dの製造技術（混練、成型、乾留、粘結材の各技術）するとともに、設備の耐久性を検証する。 ・高炉においてフェロコークスが長期使用（原単位30kg/t）であることを実証する。 ・フェロコークスでコークスを1/3置換した場合の製鉄工程における省エネ効果10%を検証する（新規数式シミュレータによる推定含む）。 ・中規模設備（300t/d）で実用性（省エネ・CO2削減効果・製造コスト低減）が認められれば、研究開発補助金制度に則り、製鉄プロセスにおいてそのまま工程化する（2023年以降）。 ・上記設備で構成された商用規模設備（900～1500t/d規模）のFS（設備・操業コスト、及び使用エネルギーの評価）を実施し、実用性が認められれば、2030年までに5基導入を目指す 	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2013年3月 作成</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>2017年2月 改訂（フェロコークス技術の開発を追加） 2018年1月 改訂（フェロコークス技術の開発の実施期間を5年から6年に延長）</p>

プロジェクト用語集

<各開発項目共通>

No.	用語	意味・説明
1	フェロコークス	鉄鉱石と石炭を粉砕し、塊状に成形したものを乾留することによって塊内部をフェライトとコークスが混在する状態にしたもの。焼結鉱に混ぜて高炉に投入することによって、Fe の触媒効果により還元反応が促進される。
2	高炉	鉄鉱石を主原料、コークスを主還元材として溶鉄を製造する縦型炉である。現在は内容積 4,000m ³ から 5,000m ³ のものが主流であり、一日に約 10,000t 以上製造可能である。炉の上から鉄鉱石、コークスを投入し、羽口と呼ばれるノズルから約 1,000°Cの熱風を吹き込み、コークスと酸素が反応することによりを約 2,000°Cの一酸化炭素を発生させる。この CO が炉内を上昇する過程で鉄鉱石を昇温・還元・溶解し、約 1,500°Cの溶鉄（カーボン飽和鉄）が製造される。還元で使用された CO は、いずれすべて CO ₂ となり、系外に排出される。
3	還元材	酸化鉄である鉄鉱石から酸素を奪うためのもので、高炉では石炭系、水素系の物質が使用される。
4	コークス	高炉で主に使用される還元材。石炭を乾留して製造する。溶鉄 1t を製造するために約 350kg のコークスが使用される。コークスは還元材としてだけでなく、炉内を通過する還元ガス（一酸化炭素）の通り道（通気）を確保するためのスペーサー、熱を確保するための発熱材の役割も担っている。したがって高炉を操業するためには、溶鉄 1t を製造するためには 250kg 程度のコークスは最低限必要であるといわれている。
5	一般炭	製鉄用に使用されている石炭（コークス製造用、高炉吹込み用）を原料炭と称する。原料炭以外の石炭を総称して一般炭と呼ぶ。
6	低品位原料	鉄鉱石中に含まれる鉄分（Fe 含有率）の低いもの、脈石分（SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 等）が多いもの、製鋼工程で除去が必要な成分（P）を多く含むもの、結晶水を多く含むもの、などの総称。
7	ドラム強度指数	ドラム試験機にて、ドラム内に 25mm 以上または 50mm 以上のコークス 10kg をいれて 15rpm で 30 回転また

		は 150 回転させたのち、篩で篩分けして、ふるい上質量のものと試料に対する百分率で、各回転に対する強度を表す。(JIS K2151 に規程
--	--	------------------------------------------------------------------------

<フェロコックス製造中規模設備での製造技術実証>

<一般炭、低品位原料使用時の製造技術>

8	乾留	石炭を不活性雰囲気下で蒸し焼きにし、コークス化すること
9	切り出しフィーダー	粉体状原料(鉄鉱石粉、石炭粉、固体バインダー)を一定重量切り出すための装置
10	混練	固体状粉体(鉄鉱石粉、石炭粉、固形バインダー)に液体バインダーを混ぜて高温下で練り合わせ、固体状粉体が均一に混合された状態(混練物)にする操作
11	成型	上記混練物をダブルロール成型機に供給し、豆炭状(容積 600)の塊成物(成型品)を得る操作
12	羽口	乾留炉壁面に取り付けた通風口。 ガスを乾留炉内へ送る送風口(高温ガス羽口、低温ガス羽口、冷却ガス羽口)や、逆に、乾留炉内からガスを抽出する抽出口(抽出羽口)も総称して羽口と呼ばれる。
13	フェロコックスタール	成型品を乾留炉に装入し、乾留する過程でフェロコックスより発生するタール(コークス炉から発生するコールタールよりも低分子量の中低温タール)
14	離散要素法	離散要素法(Discrete Element Method、DEM)は、解析の対象を自由に運動できる多角形や円形・球の要素の集合体としてモデル化し、要素間の接触・滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの要素の運動を逐次追跡して解析する手法である。
15	ピソライト鉱石	豪州産鉄鉱石は、かつては高品位の縞状鉄鉱床(BID:Banded Iron Deposit)由来のものが主体であったが、近年は縞状鉄鉱床が枯渇傾向にあり、チャンネル鉄鉱床(CID:Channel Iron Deposit)由来のものが増加している。 チャンネル鉄鉱床は、河床に沈殿した魚卵状を呈する褐鉄鉱(針鉄鉱)が主体の鉄鉱床で、そこから得られる鉄鉱石をピソライト鉱石と称す。結晶水を多く含むことから、その分鉄含有量が低い。

<新バインダーの強度発現実証>

16	バインダー	物と物を接着する物質。接着剤、固着材、固着剤。接合材。 フェロコックスにおいては、石炭粒子と鉱石粒子を接着するもの。
17	ASP	アスファルトピッチ。石油由来の固形バインダー。
18	SOP	ソフトオイルピッチ。石炭由来の液体バインダー
19	剛性バネモデル(RBSM)	剛体同士の接触面にバネが入っているものとし、剛体

		の変位と接触面の応力との間に比例関係を仮定し、解析領域全体の平衡方程式を解く。接触面の応力が破壊条件を超えるような場合には、このバネを切っしまい、剛体同士の相互作用が無くなるものとする。これにより、解析対象物の変形や割れが表現される。
20	ハードグローブ粉砕性指数 (HGI)	石炭及びピークスの粉砕のし易さを表す代表的な指数。測定法は以下の通り。 気乾・縮分した試料を 4.75mm 以下に予備粉砕後、1.18mm~600 μ m になるように粉砕、篩い分け、調製した試料から 50g を、あらかじめ直径 25.4mm の鋼球 8 個を入れた粉砕室に入れ、トップリングを鋼球 8 個の上に乗せ、284 \pm 2N 以上の荷重を加え、毎分 15~20 回転 (15~20RPM) の回転速度で 60 回転し粉砕 (約 3 分間) 砕製物を目開き 75 μ m の篩いで、篩い分け装置を用いて 20 分間の篩い分け、篩い上質量を 0.01g の桁まで秤量し、50g からこの値を差し引いて、篩い下の質量 W (g) とする。算出式: $HGI = 13 + 6.93W$
21	空隙率分布	粉粒体充填層における空間率の分布

<フェロコークス導入効果の検証>

22	荷重軟化試験	実高炉での装入物 (焼結鉱など) の挙動と特性を測定する装置。実高炉では荷重を受けながら、昇温、還元が進むので、荷重、温度、ガス条件など高炉の条件を模擬して実験される。測定項目は、還元反応の進み具合、層の収縮、通気抵抗などである。
23	還元率	高炉装入物 (焼結鉱) などの反応の進み具合を評価する指標。反応前に含まれる還元されるべき酸化鉄中の酸素量に対する、奪われた酸素量の比率で求める。(100%還元率は還元終了の意味)
24	ガス利用率 (η_{CO} , η_{H_2})	下方から上昇する還元ガス (CO , H_2) が、還元を利用して CO_2 , H_2O にそれぞれになった比率を表す指標。 $\eta_{CO} = CO_2 / (CO + CO_2) \cdot 100$ で算出される。
25	直接還元	コークスなどの固体炭素による酸化鉄の還元。 CO による酸化鉄の還元であっても生成した CO_2 がカーボンソーリューション反応を生ずれば結果として直接還元となる。水素についても、還元の結果生成した H_2O が固体炭素との水性ガス化反応を生ずれば直接還元となる。
26	間接還元	酸化鉄の CO や H_2 による還元反応

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の 背景・目的・位置づけ

鉄鋼業は我が国産業部門の中でCO₂発生量の約40%、国全体の約14%を占める（2018年度）最大のCO₂排出業種であり、中でも特に排出量の多い高炉法による製鉄プロセスにおいては地球温暖化対策として抜本的なCO₂排出量の削減が求められている。

しかしながら、我が国の鉄鋼業についてみると、製鉄技術は既に世界最先端の水準にあり、廃熱や副生ガスの利用による省エネルギーも極限に達しているため、ポスト京都議定書に向け世界規模でのCO₂削減を実現するためには、革新的な製鉄プロセス技術開発が必要とされている。2007年5月に発表された地球温暖化に関する総理のイニシアティブ「美しい星50（Cool Earth 50）」においても、示された三原則の一つとして「省エネなどの技術をいかし、環境保全と経済発展とを両立すること。」が提言されており、「革新的技術開発」の一例として水素還元活用プロセス（COURSE50）が位置付けられているところである。

上記のイニシアティブを踏まえて2008年3月、全世界の温室効果ガス排出量を現状に比べて2050年までに半減するという長期目標実現に向け、経済産業省において「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」が策定されている。その中において革新的製鉄プロセスは効率



図1-1 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術

出典：経済産業省 「Cool Earth エネルギー革新技術計画」 2008年3月

の向上と低炭素化の両面から、CO₂大幅削減を可能とする「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術21」の一つとして位置付けられている。

また、その後に策定されたエネルギー基本計画（2010年6月）においても革新的製鉄技術として「環境調和型製鉄プロセス」にフェロコークス技術が記載された。2011年省エネ技術戦略において、「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」として取り上げられ、省エネルギー、CO₂削減への効果が期待されている。

2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」においても、「既存技術のみならず、高効率化及び低炭素化のための革新的な製造プロセスの技術開発（革新的製鉄プロセス、環境調和型製鉄プロセス）を実施し、当該技術の2030年頃までの実用化に向けた省エネルギー推進、二酸化炭素排出削減に取り組む」ことが示されている。別表1-17においては、2030年においてフェロコークス製造設備が5基導入された時点における、省エネルギー効果量及びCO₂排出削減量が、それぞれ、19.4万kL/年（原油換算量）及び82万トン/年と試算されている。

具体的な対策	各主体ごとの対策	国の施策	地方公共団体が実施することが期待される施策例	対策評価指標及び対策効果						
				対策評価指標	省エネ見込量	排出削減見込量	省エネ見込量及び排出削減見込量の積算時に見込んだ前提			
省エネルギー性能の高い設備・機器等の導入促進（鉄鋼業）										
革新的製鉄プロセス（フェロコークス）の導入	<ul style="list-style-type: none"> 事業者：革新的製鉄プロセスに係る技術開発 事業者：革新的製鉄プロセスを用いた工程の導入 	<ul style="list-style-type: none"> 革新的製鉄プロセスに係る技術開発の支援 革新的製鉄プロセスを導入した設備の導入に対する支援 	—	導入設備数（基）	（万kL）	（万t-CO ₂ ）	<ul style="list-style-type: none"> ・対策評価指標1単位当たりの省エネ量（原油換算）＝約3.9万kL/基（高炉1基当たりの効果） ※本技術開発による製鉄所の二酸化炭素削減効果は、革新的なコークス代替還元材（フェロコークス）を使用することで高炉内還元反応の高速化、低温化を図り、還元材比低減により実現できるものである。この場合、並行して生じる回収エネルギー低下で、購入エネルギー（電力等）が増加する影響も考慮 ・革新的製鉄プロセス（フェロコークス）の導入の省エネ量は、2012年度からの対策の進捗による省エネ量であり、排出削減量は当該省エネ量に基づいて計算 			
				2013年度	0	2013年度		0	2013年度	0
				2020年度	0	2020年度		—	2020年度	—
				2030年度	5	2030年度	19	2030年度	82	

別表1-17

出展：環境省 地球温暖化対策計画（2016年5月）

その後の省エネ技術戦略2016において、産業部門の主要関連技術には革新的製鉄プロセスとして革新的製鉄プロセス、環境調和型製鉄プロセスが記載されている。また、図1-2 導入シナリオ、図1-3 技術シートにその開発の位置付けが示されている。

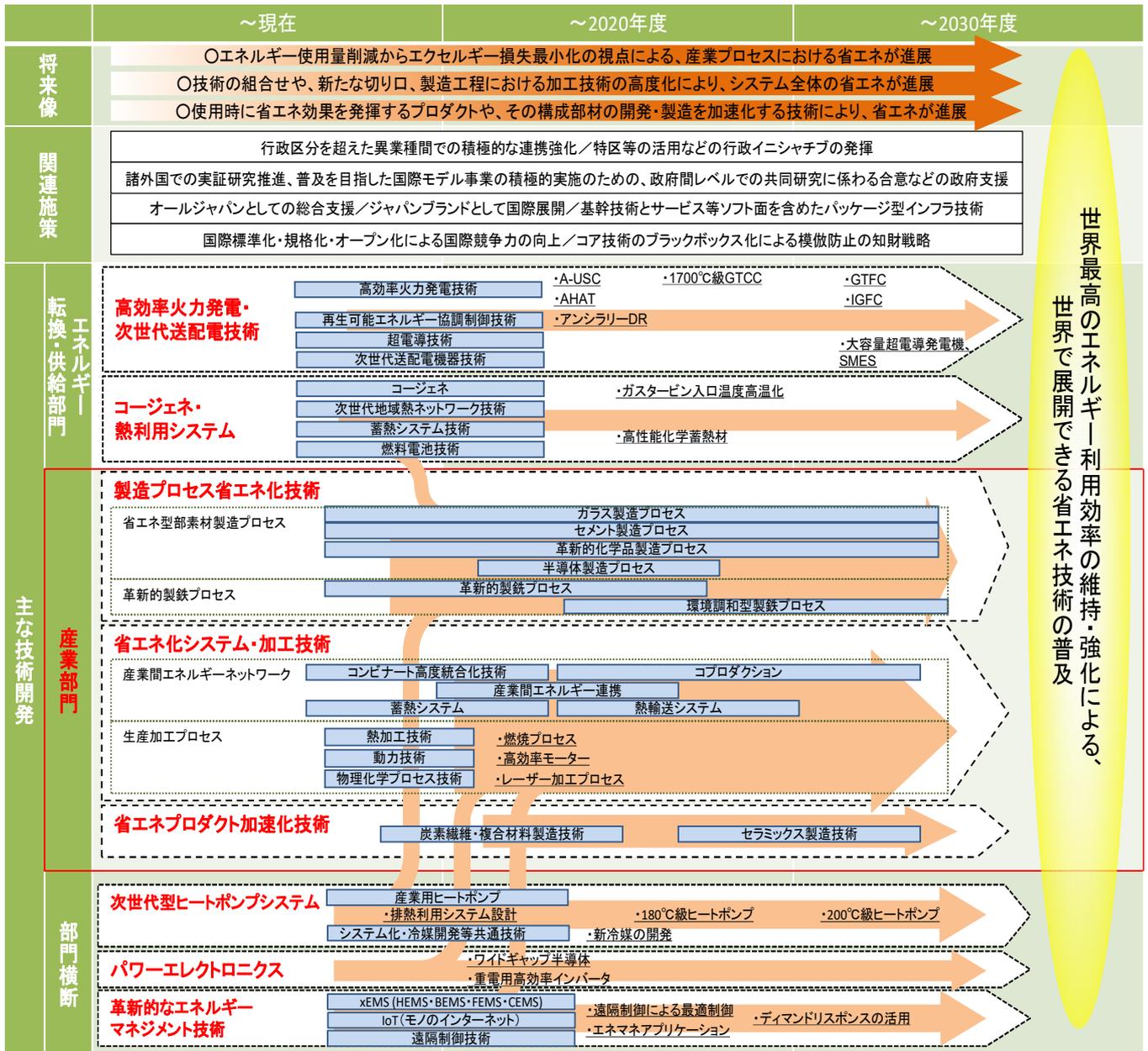


図 1-2 革新的製鉄プロセスの導入シナリオ

製造プロセス省エネ化技術サブシート（革新的製鉄プロセス）

技術概要

我が国鉄鋼業は産業部門全体のエネルギー消費の25%を占めるエネルギー多消費型産業であるものの、既に排熱回収利用等の省エネ設備の導入により、製鉄プロセスにおいて世界最高水準の原単位を達成している。エネルギー削減ポテンシャルは世界で最も低い、世界の近代製鉄を支えた高炉法の革新を促し、更なる高炉効率の向上を図ることで省エネを着実に推進する。具体的には、高炉内還元反応の高速化・低温化機能を発揮するフェロコークス（低品位炭と低品位鉄鉱石の混合成型・乾留により生成されるコークス代替還元剤）及びその操業プロセスの開発と、従前燃料として使用されていた副生コークスガスを還元に適する仕様に改質し、高炉にて還元剤として使用することと二酸化炭素濃度が高い高炉ガスから二酸化炭素を分離するため、製鉄所内の未利用低温排熱を利用した新たな二酸化炭素分離・回収技術の開発を進める。

技術開発の進め方・その他留意点

資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発については、2020年代初頭までに研究開発を行い、その後実機高炉への実証的導入を経て、2025年以降の本格的な導入普及を目指す。

環境調和型製鉄プロセス（水素還元技術および未利用排熱活用高炉ガスCO₂分離回収技術等）については、2020年台後半までに研究開発を行い、その後実用化研究を経て、2030年頃の1号機実機化を目指す。その後は、高炉改修のタイミングを踏まえつつ導入普及を図る。

技術開発動向

国家プロジェクトとしては、「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」が終了し、革新的な高炉原料であるフェロコークスの製造プロセスについて、パイロット規模での基盤技術が確立され、引き続き実用化に向けた検討が進められている。また、「環境調和型製鉄プロセス技術開発」は継続中であり、水素還元技術については、スウェーデンの試験高炉を使用する事で、鉄鉱石水素還元の可能性を確認した。更に水素還元技術確立の為、新日鐵住金・君津製鐵所において、試験高炉を建設準備中である。又、未利用排熱活用高炉ガスCO₂分離回収技術等では、CO₂濃度が高い高炉ガスからのCO₂を分離するため、新たな化学吸収法や物理吸着法の開発等が進められているが、効率良く未利用排熱を活用するための要素技術（ケミカルヒートポンプ技術及び、相変化物質による蓄熱・熱輸送技術等）の開発が課題となっている。これまで、モデル製鉄所排熱状況の整理と排熱

波及効果

資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発も環境調和型製鉄プロセス（水素還元技術および未利用排熱活用高炉ガスCO₂分離回収技術等）のいずれの技術も、省エネルギーと同時にCO₂削減に寄与する。長期的にはCCS技術を組み合わせることによりCO₂排出量抑制を図ることができる。

また、還元剤としてのコークス使用量が減少するため、エネルギー安定供給の確保にも寄与する。早期実用化のために、これらの技術開発を加速的に実施することで、国際競争力の維持・強化にも寄与する。

図1-3 技術シート

出典：資源エネルギー庁 NEDO 省エネルギー技術戦略 2016

鉄鉱石の還元は、コークスによる直接還元と羽口から投入される石炭等のガス化ガスによる間接還元に分類される。そのうち、直接還元は、大きな吸熱反応を伴うことから、高炉の温度維持ため、外部から熱の投入が必要となる。現状の高炉では、直接還元の比率が約3割を占めることから、その還元比率の削減により、CO₂排出削減、省エネルギーを達成することが可能なる。

環境調和型プロセス技術の開発においては、これまで水素還元活用プロセス（COURSE50）として、コークス製造時に発生する高温のコークス炉ガス（COG）に含まれる水素を増幅し、コークスの一部代替に当該水素を用いて鉄鉱石を還元する技術、及び高炉ガス（BFG）からCO₂を分離

するため、製鉄所内の未利用排熱を活用した革新的なCO₂分離回収技術の開発に取り組んできた。これらの技術開発においてフェーズI-STEP1（2008～2012年度（5年間））として要素技術開発を実施した。フェーズI-STEP2（2013～2017年度（5年間））において要素技術を組合せたパイロットレベルの総合実証試験を行った後、フェーズII-STEP1（2018～2022年度（5年間））、フェーズII-STEP2（2023～2025年度（3年間））での実用化開発を経て、最終的に製鉄所における現状の全排出レベルに比較して約30%のCO₂削減を可能にする技術の確立に資するものである。

一方、同一基本計画において実施しているフェロコークス技術の開発は、革新的製鉄プロセスの先導研究（2006年～2008年）で基本原理を明確にしたのち、資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発（2009～2012年度（4年間））において要素技術開発を実施し、既に実証段階に到達しているプロセスである。本プロセスでは、一般炭と低品位鉄鉱石の混合成型・乾留により生成された金属鉄の触媒作用を利用して還元を低温で行い、還元効率を飛躍的に高めた革新的塊成物（フェロコークス）を使用することで投入するコークス量を削減できる省エネ技術開発である。本プロセス技術で得た知見や成果を、水素還元活用プロセスの中に取り込むことで省エネ、CO₂削減効果を最適化できるメリットを享受できることから、2017年度より、フェロコークス技術の開発を加えて一体化することにした。本プロセスでは、今後、フェロコークス製造量300t/dの規模の中規模設備を建設し、フェロコークス製造技術を確立するとともに、中規模設備で製造したフェロコークスを溶銑製造量10,000t/dの実高炉に連続的に長期装入したときの高炉の還元材比や操業安定性（特に通気性）に及ぼす影響を確認し、最終的に製鉄プロセスのエネルギー消費量を10%削減する技術の確立に資するものである。

◎技術優位性と開発意義

2017年度～2018年度において、「環境調和型プロセス技術の開発に係る技術開発動向の調査」、2018年度～2019年度においては「各国の鉄鋼業における政策・技術開発の長期見通しに係る調査」を行った。その調査結果として、

鉄鋼需要については図1-4に示す様に、2010年度以降は中国の一方向的な伸びは終息を見せるものの、全体としては2050年には世界の鉄鋼生産量が23億t/年に達すると予測されている。増加の大きな要因はインドである。インドについては2017年度にインド鉄鋼省が、現在約1億t/年である生産能力を2030年度までに3億t/年、2050年までに5億t/年に増加するという政策ポリシーを発表している。

本技術開発により、今後需要の伸びが見込まれる鉄鋼業に対して、大きな省エネルギー、CO₂削減効果が期待される。

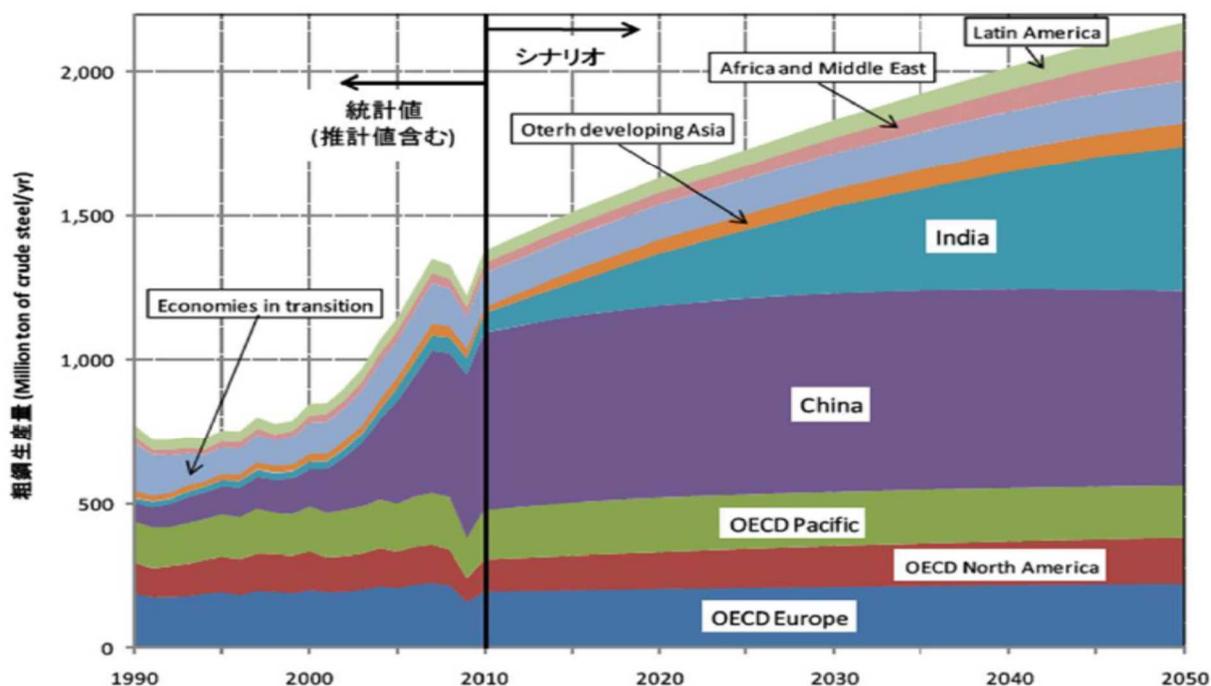


図 1-4 地域別の粗鋼生産実績と将来シナリオ (RITE)

出典：RITE（地球環境産業技術研究機構）成果報告 2010 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「脱地球温暖化と持続可能な経済社会実現のための対応戦略の研究」要約編

◎フェロコークス技術の新規性、優位性

フェロコークスのバックグラウンドとなる技術要素を示したものが図 1-5 である。従来の研究によると、コークスの金属鉄に対する還元反応性は、金属鉄とコークスとの距離に依存しており、距離が小さいほど反応性が高まるとされている。フェロコークス技術はこの原理を利用してコークス内に金属鉄を適正に内在することで、金属鉄とコークスの近接性を高め、コークスとしての反応性を高める技術である。フェロコークス開発の目的は、コークスとしての反応性を高めることにより、高炉内における鉄鉱石の還元効率が向上し、還元材比の低減を図ることができることから、製鉄工程における省エネルギー化、CO₂削減を進めるものである。

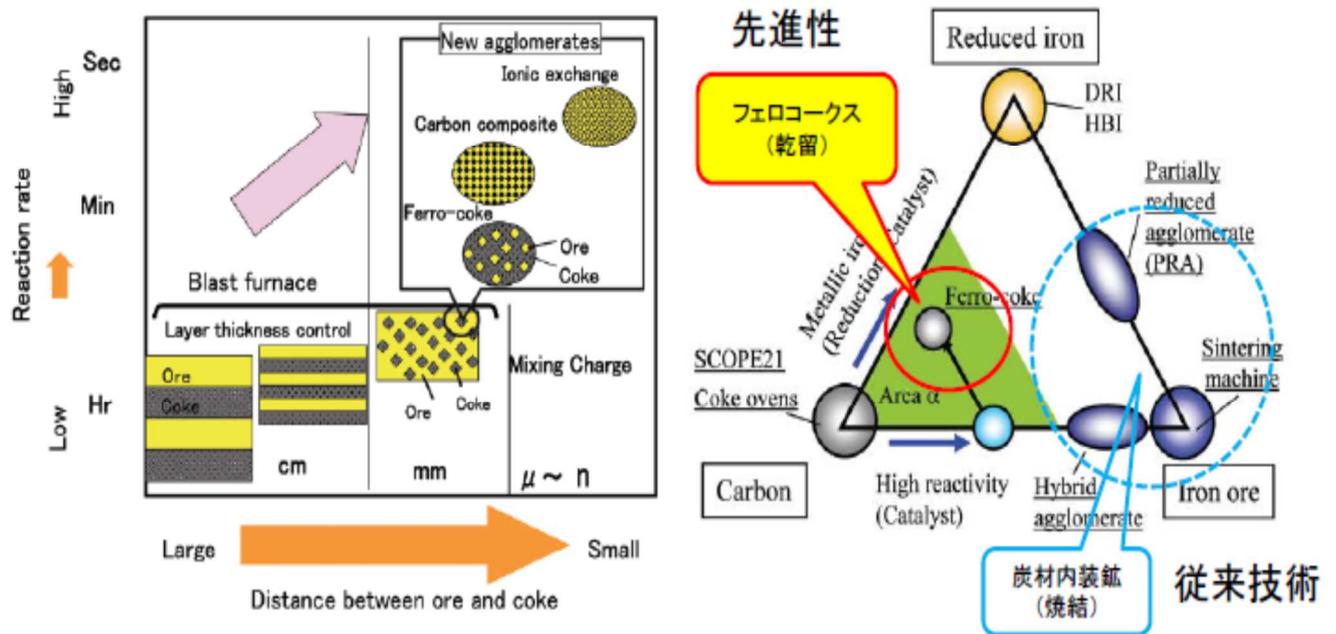


図 1-5 フェロコークスの原理

出展：NEDO 2017 年度～2018 年度成果報告書

環境調和型プロセス技術の開発「環境調和型プロセス技術の開発に係わる技術開発動向等の調査」

フェロコークス技術、炭材内装炭技術に関する各国の学術文献数と技術比較を行い、フェロコークス技術の学術的な先進性を評価した。論文発表の動向は、コークス、焼結鉱、乾留等をキーワードとして調査した。別途、特許データベースにより、フェロコークス技術に関連した特許の、国内外での出願・登録状況を調査した。

1997 年～2007 年の期間におけるフェロコークスに係わる学術論文数は、日本からの公表が 25 件と最も多く、ついで欧州（12 件）、北米（7 件）となっている。

図 1-6 は 2008 年以降のフェロコークス及び炭材内装炭の関連文献の国別件数を示す。特に、日本からフェロコークス及び炭材内装炭技術分野の論文発表件数が突出している。日本以外では、フェロコークスの反応性に関する論文は、米、中国、ドイツの 3 件と少なく、フェロコークス技術の優位性が示されている。

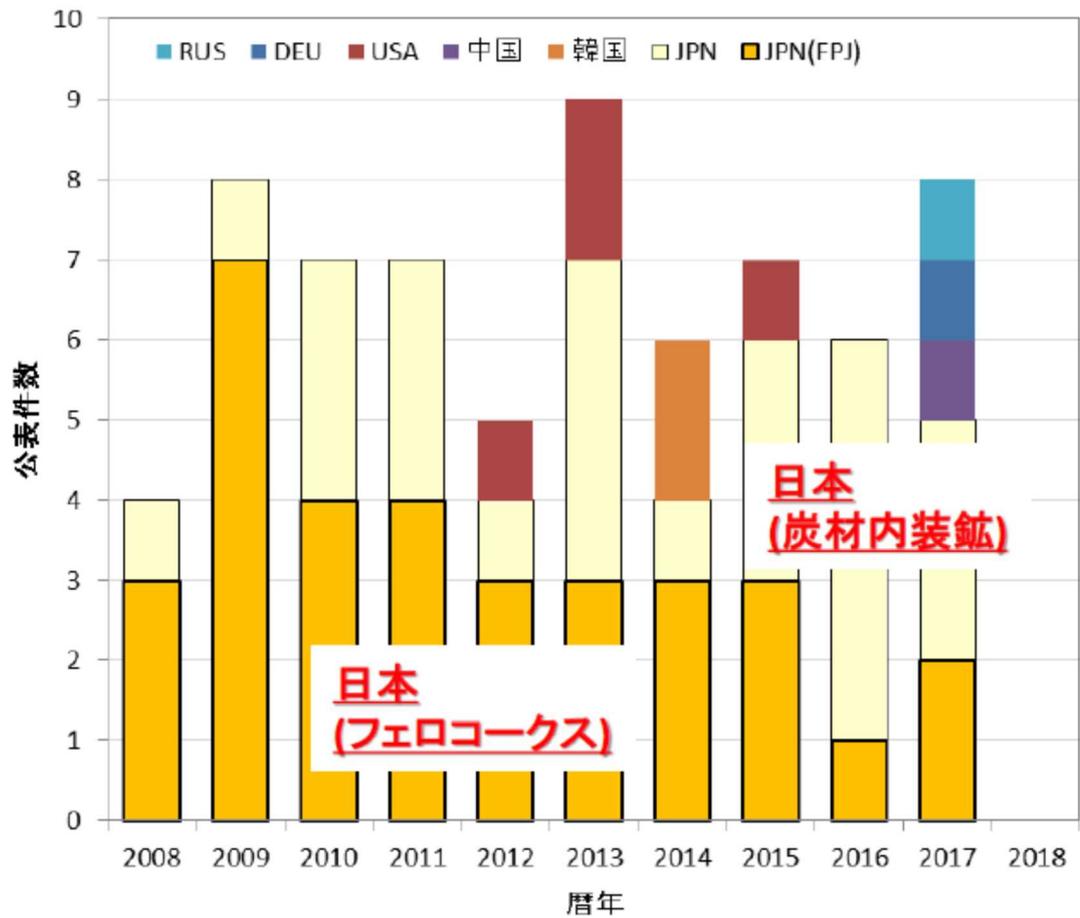


図 1 - 6 関連文献件数

出展：NEDO 2017 年度～2018 年度成果報告書

環境調和型プロセス技術の開発「環境調和型プロセス技術の開発に係わる技術開発動向等の調査」

◎フェロコークス技術の開発と COURSE50 技術の関係について

フェロコークス技術の開発と水素還元活用プロセス技術の開発については、環境調和型プロセス技術の開発という同一の基本計画の下にある。両プロジェクトの比較を以下に示す。

②フェロコークス技術の開発	比較項目	①水素還元等プロセス技術の開発(COURSE50)
・革新的塊成物（第三の装入物）を創生する中規模製造技術	開発技術	・水素還元、CO ₂ 分離回収技術 ・排熱、顕熱回収技術
・資源対応力強化（低品位資源利用） ・製鉄工程の省エネルギー	社会要請	・低炭素社会実現 ・製鉄プロセスからのCO ₂ 削減
2022年～2030年（短中期） 高炉の改修不要	実用化・ 事業化時期	2030年～2050年（中長期）

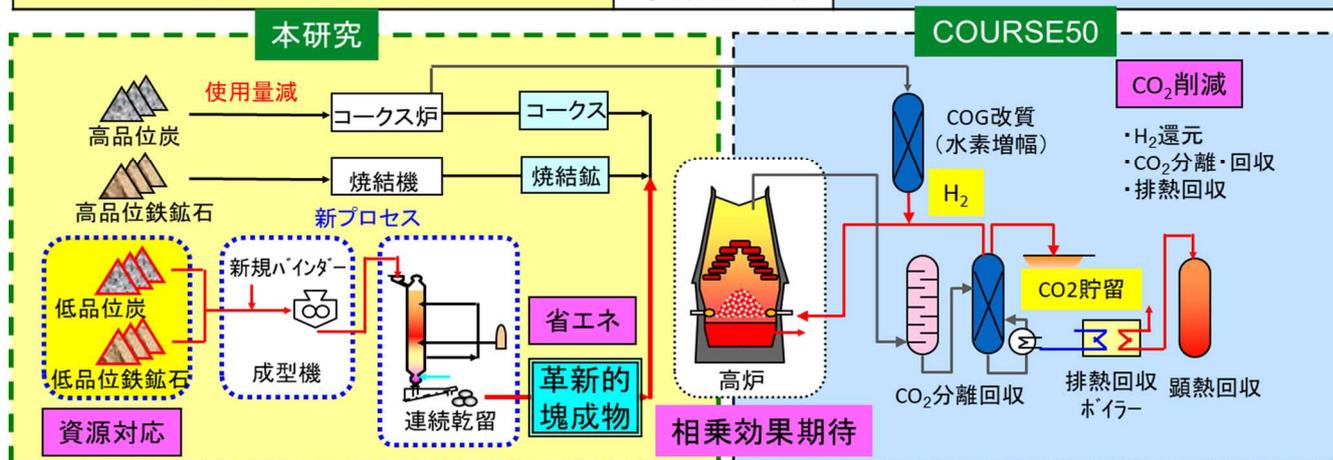


図 1-7 フェロコークスと COURSE50 との関係

フェロコークス技術の開発は低品位鉄鉱石と一般炭という資源から塊成物を作り、高炉へ装入することで主に省エネ効果を求め、また低品位の資源を使うことから、資源対応力の強化に繋がる。高炉を改造する必要が無いことから、実用化時期も2022年～2030年に国内5基への展開と、比較的炭中期の計画である。一方で COURSE50 はコークス炉で出る水素を改質して高炉へ導入することでCOによる間接還元を減らす、また、高炉より排出されるCO₂を回収することで、CO₂削減をめざすが、導入に当たっては高炉の改修が必要となることから、導入時期も2030年以降高炉改修に合わせて行うことになっており、フェロコークスと比較すると中長期的な時間軸となっている。

最終的に両技術が確立された時点では、それらの相乗効果が期待されるものである。

◎2050年以降に向けた取り組み

革新的環境イノベーション戦略（2020年1月）の中で、2050年以降のできるだけ早い時期までに、現在の高炉法による鉄鋼製造と同等のコストで、「ゼロカーボンスチール」を実現する水素還元製鉄技術等の超革新技術の開発を行うことが示されている。またその中では、「ゼロカーボンスチール」の実現には長期的な研究開発が必要となるため、現行の高炉法における低炭素化、省エネルギー対策も重要となる。COURSE50 やフェロコークス技術の開発を引き続き行い、2030年頃の実用化を目指すものである。

化石資源依存からの脱却（再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用）

⑩ 水素還元製鉄技術等による「ゼロカーボン・スチール」の実現

【目標】

- 2050年以降のできるだけ早い時期までに、現在の高炉法による鉄鋼製造と同等のコストで「ゼロカーボン・スチール」を実現する水素還元製鉄技術等の超革新技術の開発を行う。実用化には、2050年の水素コスト（プラント引渡しコスト）20円/Nm³ という目標をさらに下回る水準でCO₂フリー水素が安定的かつ大量に供給されることが必要。世界のCO₂削減量は約38億トン。¹⁾

【技術開発】

- 「ゼロカーボン・スチール」の実現には長期的な研究開発が必要となるため、現行の高炉法における低炭素化、省エネルギー対策も重要となる。そのため、COURSE50やフェロコックス技術の開発を引き続き行い、2030年頃の実用化を目指す。
- COURSE50及びフェロコックスの開発で得られる知見を足掛かりとして、「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた更なる革新技術を検討する。このため更なる革新技術に関するFS事業を実施し、高炉法による水素還元技術（COURSE50技術の拡大）、直接還元法による水素還元製鉄技術、CCUS等の技術開発や実用化における諸課題の抽出等を行う。当該結果を踏まえ、ナショナルプロジェクトによる支援の下に「ゼロカーボン・スチール」を実現する革新技術開発を進める。

【実施体制】

- 国際的な競争領域であるため、国内鉄鋼メーカーを中心とした連携により技術開発を進める。

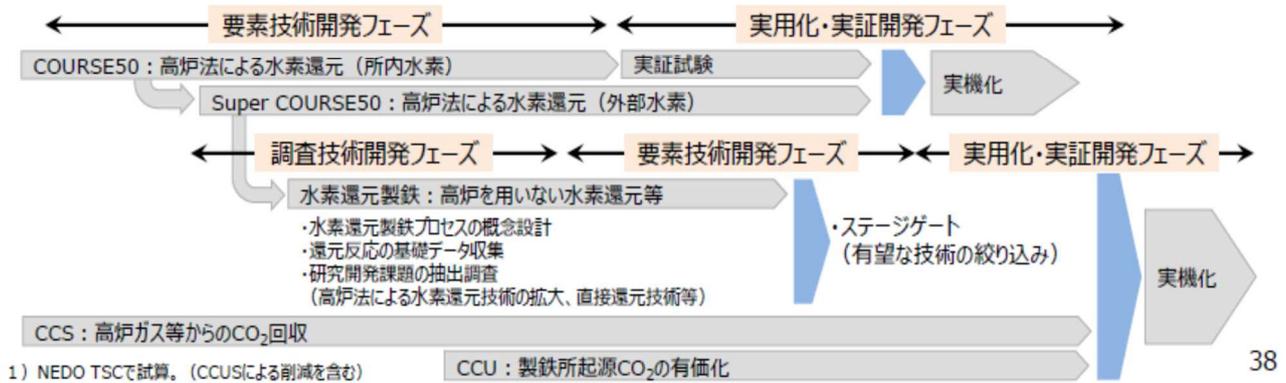


図 1-8 革新的環境イノベーション戦略におけるフェロコックスの位置づけ

出典：統合イノベーション戦略推進会議 革新的環境イノベーション戦略 2020年1月

2. NEDO の関与の必要性

2-1 NEDO が関与することの意義

鉄鋼業における CO₂ 排出量は、我が国産業の製造部門の排出量の約 40% を占めており、そのうちの約 70% は高炉による製鉄プロセスで発生している。このため、我が国の産業部門における CO₂ 削減対策を考える上で、高炉による製鉄プロセスで発生する CO₂ 排出量の削減は喫緊の課題となっている。

他方、我が国鉄鋼業では、オイルショック以降、現在までの約 40 年にわたって、総額 4.7 兆円もの投資をして省エネ技術の開発・導入を進め、既に世界最高効率の省エネを達成。現時点で経済性の成り立つ主要な技術はほぼ導入済みの状況にあり、残された対策については、経済性・開発リスクの観点から民間ベースでの開発・導入が困難な分野となっている。

とりわけ、高炉による製鉄プロセスから発生する CO₂ 又はエネルギー消費量を抜本的に削減する本プロジェクトは、鉄鋼業における省エネ対策の最後の切り札として、2030 年に最大 5 基の導入を目指し、未だ世界で手がけたことのない革新的な技術開発を行うものであり、高度な技術を要すること、長期にわたること、及び巨額の設備投資を伴うため、開発リスクも大きく、民間のみでは取り組むことが困難であり、国内高炉メーカー、大学等のノウハウを結集するため、国がイニシアティブをとり、産官学のコンソーシ

アムを構築し、一体的かつ効率的に開発を実施していく必要がある。

地球温暖化という世界的課題の中で我が国の省エネ・省CO₂対策への取組の重要性はますます高まっており、政府において、「長期エネルギー需給見通し」（平成2015年7月経済産業省決定）、「地球温暖化対策計画」（2016年5月閣議決定）が策定されたところであり、その対策として本技術が盛り込まれていることから、その達成に向けて、本プロジェクトは、国として強力なイニシアティブを発揮して総合的に推進することが必要である。

2-2 実施の効果（費用対効果）

フェロコークス事業において、そのアウトカムは2030年時点で省エネルギー効果量は、原油換算量9.4万kL/年、CO₂削減量82万トン/年、また、一般炭購入に伴う経済性としては、約280億円/年が見込まれる。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本事業の目標を下記に示す。

【中間目標（2020年度）】

①フェロコークス製造中規模設備（以下「中規模設備」という。）での製造技術実証

①-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立

①-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

- ・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを完成させ、混合均一性の計算ができることを確認する。
- ・300 t/dの実証設備を建設し、連続一貫製造の負荷運転を実施する。
- ・フェロコークスが設計どおりできることを確認する。

指標1：原料の均一混合技術の確立（個体3種類、液体1種類の混合）混合度95以上（ラボ実験）

指標2：乾留後塊成物のドラム強度： $DI150/15 \geq 80$ （ラボ実験）

②一般炭, 低品位原料使用時の製造技術

- ・使用可能な一般炭2銘柄及び低品位鉄鉱石2銘柄の選定を完了させる。
- ・一般炭と低品位鉄鉱石、及び(d)で製造した固形新規バインダーを用い、ラボスケールの成型試験を行い、各配合比率等の成型条件を確立する。

指標：成型物の強度（I型ドラム強度）： $ID30/15 \geq 85$ （ラボ実験）

③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

- ・ラボ検討に基づきフェロコークスを実高炉に装入するための適切な装入方法を提示する。
- ・フェロコークスの高炉への装入設備の設置を完了させる。

指標：フェロコークスの実高炉への装入量3 kg/t程度で、安定して装入できることを確認する。

④新バインダー強度発現実証

- ・中規模設備に供し得る新規固形バインダーを試作する。
- ・液体新規バインダーの試作をおこない、タブレットスケールで所定の冷間強度を確保できることを実証する。

- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルのプロトタイプを作成を完了する。バインダー及び鉄鉱石を配合した塊成物をモデル物質として強度評価を実施し、モデル計算結果との比較を実施する。

指標：液体新規バインダーの製造オプションの提示。

⑤フェロコークス導入効果の検証

- ・中規模設備で製造したフェロコークスの高温性状の調査を実施する。
- ・④で開発した新規固形バインダーと新規液体バインダーを用いてラボスケールで作成したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルに組み入れる。

【最終目標(2022年度)】

① 中規模設備での製造技術実証

①-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立

②-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

- ・生産量300t/dで長期間安定稼動が可能なことを実証する。
- ・高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。
- ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用い、均一性を確保できる運転条件を提示する。

指標1：原料の均一混合技術の確立（固体3種類、液体1種類の混合）：混合度95以上

指標2：乾留後塊成物のドラム強度： $DI150/15 \geq 80$ （*）

（*）「資源対応力のための革新的製鉄プロセス技術開発」において、フェロコークス製造量27.5t/d～30t/dとし、乾留炉操業30日間で740tのフェロコークスを製造した際、目標強度 $ID30/15 > 81$ 以上の歩留りが93.5%であった。

②一般炭、低品位原料使用時の製造技術

- ・ラボスケールでの試験結果から、原料（鉄鉱石、石炭）の絞込みを行う。これら原料がフェロコークス用原料として適していることを検証する。

指標：成型物の強度（I型ドラム強度）： $ID30/15 \geq 85$

③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

- ・高炉への長期装入試験を行い、高炉の還元材比や高炉操業の安定性に及ぼす影響を評価する。また、製鉄工程における省エネ効果に及ぼす影響を把握し、(e)の数値シミュレーションと合わせ、目標の省エネ10%を達成する。

指標：連続操業試験：30日以上

④新バインダー強度発現実証

- ・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。
- ・所定の強度を実現しうる液体新規バインダー製造プロセス案を提示する。
- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルを提示する。

指標：(a)及び(b)の達成に資するものであり、指標その他は(a)、(b)と同じ

⑤フェロコークス導入効果の検証

- ・フェロコークスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。
- ・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

指標：評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認

(⑤の数値シミュレーションと③(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の省エネ10%を検証する)。

◎目標設定の根拠

①フェロコークス製造中規模設備での製造技術実証(JFEスチール、東北大学)

- ・設定理由(混合度95以上)：混合度と強度には正の相関があり、混練性が高い原料で成型した成型物は強度も高い。混練状態の違いを混練時間が異なる原料で強度と混合度の関係を調査した結果、上記の目標値とした。さらに、高炉使用時の粉化による通気性悪化を抑止するために焼結鉱と同等レベルとし、上記目標値とした。
- ・設定理由(乾留後塊成物のドラム強度： $DI150/15 \geq 80$)：高炉安定操業を担保するための強度として現在の室炉コークスをベースに設定した。

②一般炭、低品位原料使用時の製造技術(JFEスチール)

- ・設定理由(成型物の強度(I型ドラム強度)： $ID30/15 \geq 85$)：成型物強度と乾留後強度には正の相関があり、成型物強度が高い成型物は乾留後の強度も高い。成型物は成型後、ベルトコンベア、シュート等のジャンクションで落下衝撃を受ける。ジャンクションの高さが高ければその衝撃も大きく成型物の粉化も増加する。今回、ジャンクションの高さは工程化設備をベースに10mに設定し、その落下高さに耐えうる強度を目標値とした。

③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証(JFEスチール)

- ・設定理由(2019年度)(フェロコークスの実高炉への装入量3kg/t程度で、安定して装入できること)：冷間装入試験結果を実炉に反映させる際、炉熱変動により生産性に影響の少ない装入量から実施し、徐々に装入量を増やしていく。
- ・設定理由(2021年度)(連続操業試験：30日以上)：30t/dのパイロットプラントでは、成型・乾留一貫の製造は連続30日間実施したが、高炉での使用試験は、30日間作りだめしたフェロコークスを5日間で消費した。今回は、フェロコークスの製造と使用を連続的に行うため、製造およ

び使用期間をマッチングさせる必要がある。よって、本事業では製造と使用期間を30日以上に設定した。

フェロコークス300t/dでのフル製造時の高炉装入量（原単位）は30kg/t。フェロコークス中規模製造設備の稼働率目標を平均90%以上とすると、高炉装入量は平均27kg/t以上となる。

④新バインダーの強度発現実証（神戸製鋼所、東北大学）

- ・ 設定理由（新規固形バインダー使用時の成型物の強度（I型ドラム強度）：ID30/15 \geq 85）：前回プロジェクトの成果より、高炉装入に耐えうる乾留後塊成物としての品質（課題①）、およびフェロコークス中規模設備乾留工程に耐えうる成形物としての品質（課題②）として設定した。フェロコークスが実用化されるとASP（従来固形バインダー）として最大5万トン/年が必要。ASPは原油精製の副産物であり、国内市場規模は70万トン/年であるため、フェロコークスの実用化時には需給の逼迫と価格高騰が予想され、代替バインダーを開発することで、ASPの需給に制約されない安定したフェロコークス操業を図ることができる（フェロコークス技術の拡大期に必須な技術開発）。
- ・ 選定理由（新規液体バインダーの製造オプションの提示）：従来のコークス炉副生物から製造されるSOPに依存しないように、フェロコークス炉副生物である中低温タールおよび石炭を原料としたフェロコークス用液体バインダーを製造できるようにするため設定した。SOPの供給量に制約されない新規液体バインダーを供給することで、フェロコークスプラントの技術拡大、普及に資する技術である。

⑤フェロコークス導入効果の検証（日本製鉄、九州大学）

- ・ 設定理由（2019年度）：フェロコークスの高炉使用時の効果検証において、荷重軟化試験装置を用い、フェロコークス充填層を連続的にガス化昇温中に実験を中断し（例えば900℃、1200℃、1500℃など）、温度とガス化率の関係を調査評価することが、30t/dプラントの時も有効であったので設定した。
- ・ 設定理由（2021年度）：高炉内での還元反応、熔融挙動など各種の挙動を明確化し、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの精度向上につなげる為に有効な手段であるので設定した。

2. 事業の計画内容

2-1 事業内容

本事業は、フェロコークス製造量300t/dの規模の中規模設備を建設し、フェロコークス製造技術を確立するとともに、中規模設備で製造したフェロコークスを溶銑製造量10,000t/dの実高炉に連続的に長期装入したときの高炉の還元材比や操業安定性（特に通気性）に及ぼす影響を確認する。また、製銑工程全体の物質・エネルギーバランスから、省エネ効果を評価する。さらに、操業安定性を鑑みながら、フェロコークス比の影響を調査するとともに、結果の外挿及び数値シミュレーションから、フェロコークス比が33%のときの製銑工程の目標省エネ効果（10%）を達成する。

フェロコークス活用プロセスの技術開発におけるスケールアップの考え方としては、10倍を基本としている。最終的な実機は1,500トン/日の製造能力であり、これは300トン/日のユニッ

トを5つ並べた規模である。そのため、実機での技術課題は300トン/日機で検討できることから、今回の実証は300トン/日機を進める。本プロジェクトの前段である、「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発（2009年度～2012年度）においては、300t/dの1/10である30t/dのパイロットスケールで評価、「革新的製鉄プロセスの先導的研究」（2006年度～2008年度）（委託）はラボ試験のため、1/100である300kg/日のベンチスケールで評価を行なっている。

以下に、事業計画を示す。

年度	H29 2017	H30 2018	H31 2019	R2 2020	R3 2021	R4 2022
中規模設備 フェロコークス 製造技術実証	実証設備の設計・建設			製造・実証		
一般炭・低品位原料使用時の製造技術	原料選定・ラボ評価					
実高炉フェロコークス長期使用検証	フェロコークス装入検討			使用・効果検証		
新バインダー強度発現実証	製造実証				評価	
フェロコークス導入効果の検証	実験室レベルサンプル評価			中規模実証設備サンプル評価		
中間評価				★		
予算 (億円)	8.3	20.7	25.1	25.1	7.8	8.7

図2-1 事業計画

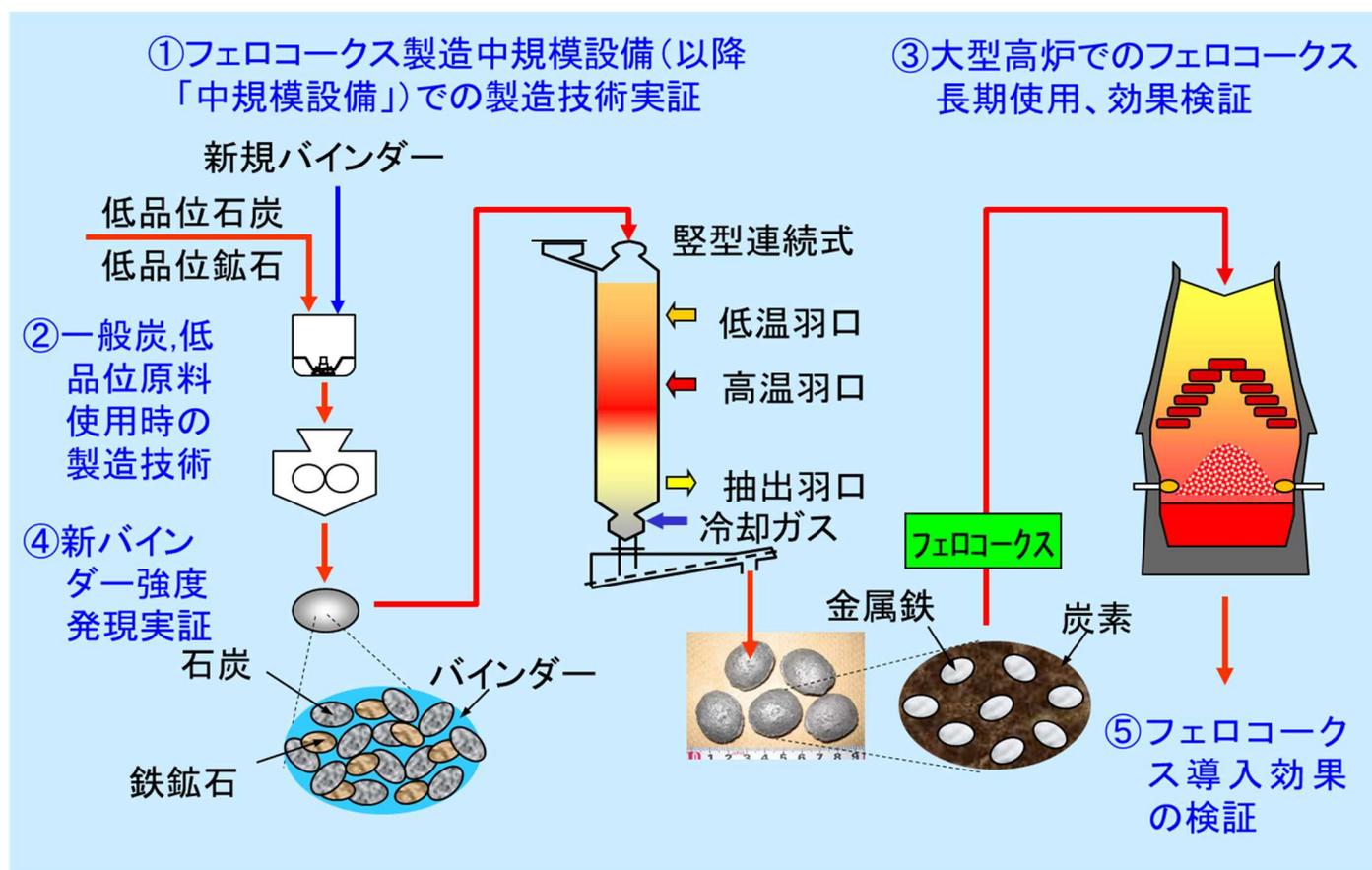


図 2-2 フェロコックス製造プロセスと研究開発テーマ

① 中規模設備での製造技術実証

「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」におけるパイロット規模試験（30 t / d）と実機（1500 t / d）の中間ステップとして、中規模設備でのフェロコックス連続製造技術を確立するため、長期操業試験を行うべく、以下の研究を行う。

- ① - 1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立
- ① - 2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立
 - ・生産量300 t / dで長期間安定稼働が可能なことを実証する。
 - ・高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。
 - ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用い、均一性を確保できる運転条件を提示する。

指標 1：原料の均一混合技術の確立（固体3種類、液体1種類の混合）：混合度95以上

指標 2：乾留後塊成物のドラム強度： $DI_{150/15} \geq 81$ （*）

(*）「資源対応力のための革新的製鉄プロセス技術開発」において、フェロコックス製造量27.5 t / d ~ 30 t / dとし、乾留炉操業30日間で740 tのフェロコックスを製造した際、目標強度 $DI_{150/15} > 81$ 以上の歩留りが93.5%であった。

② 一般炭, 低品位原料使用時の製造技術実証

「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年度～2012年度）におけるパイロット規模試験（30 t/d）で用いた石炭をベースに、更なる銘柄拡大（資源制約の緩和）、低廉化を目的に研究を行う。

- ・ラボスケールでの試験結果から、原料（鉄鉱石、石炭）の絞込みを行う。これら原料がフェロコークス用原料として適していることを検証する。

指標：成型物の強度（I型ドラム強度）： $ID30/15 \geq 85$

③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」においては還元材比とともに重要な操業管理指標である通気性の変化についての解析が課題として残されていた。本研究では、高炉での長期操業試験を通して、フェロコークスの高炉操業に与える効果（還元材比、通気性）の検証を行う。

- ・高炉への長期装入試験を行い、高炉の還元材比や高炉操業の安定性に及ぼす影響を評価する。また、製鉄工程における省エネ効果に及ぼす影響を把握し、(e)の数値シミュレーションと合わせ、目標の省エネ10%を達成する。

指標：連続操業試験：30日以上

④ 新バインダー強度発現実証

過去の研究開発においてすでに既存固体バインダーと同等以上の性能を有する新規バインダーが見出されその性能はパイロット規模試験（30 t/d）で確認されているが、さらに、フェロコークス製造においてシャフト炉による乾留工程で副生するタールを回収し、成型用バインダーとして循環使用するシステムの構築が課題として挙げられている。そこで本研究では、フェロコークス製造用バインダーの製造技術に関して以下の研究を行う。

- ・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。
- ・所定の強度を実現しうる液体新規バインダー製造プロセス案を提示する。
- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルを提示する。

指標：(a)及び(b)の達成に資するものであり、指標その他は(a)、(b)と同じ

⑤ フェロコークス導入効果の検証

乾留炉の大型化、一般炭、低品位原料の使用、新規バインダーの使用が課題であり、開発した技術の適用可能性を検証する必要がある。そこで今回は、フェロコークスの高温性状評価手法と高炉内反応シミュレーション技術の汎用性拡大技術を開発し、フェロコークスの使用が高炉操業に与える影響を以下の研究で評価する。

- ・フェロコークスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。

・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

指標：評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認

(⑤の数値シミュレーションと③(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の省エネ10%を検証する)。

2. 2 研究開発の実施体制

以下に、研究開発体制を示す。

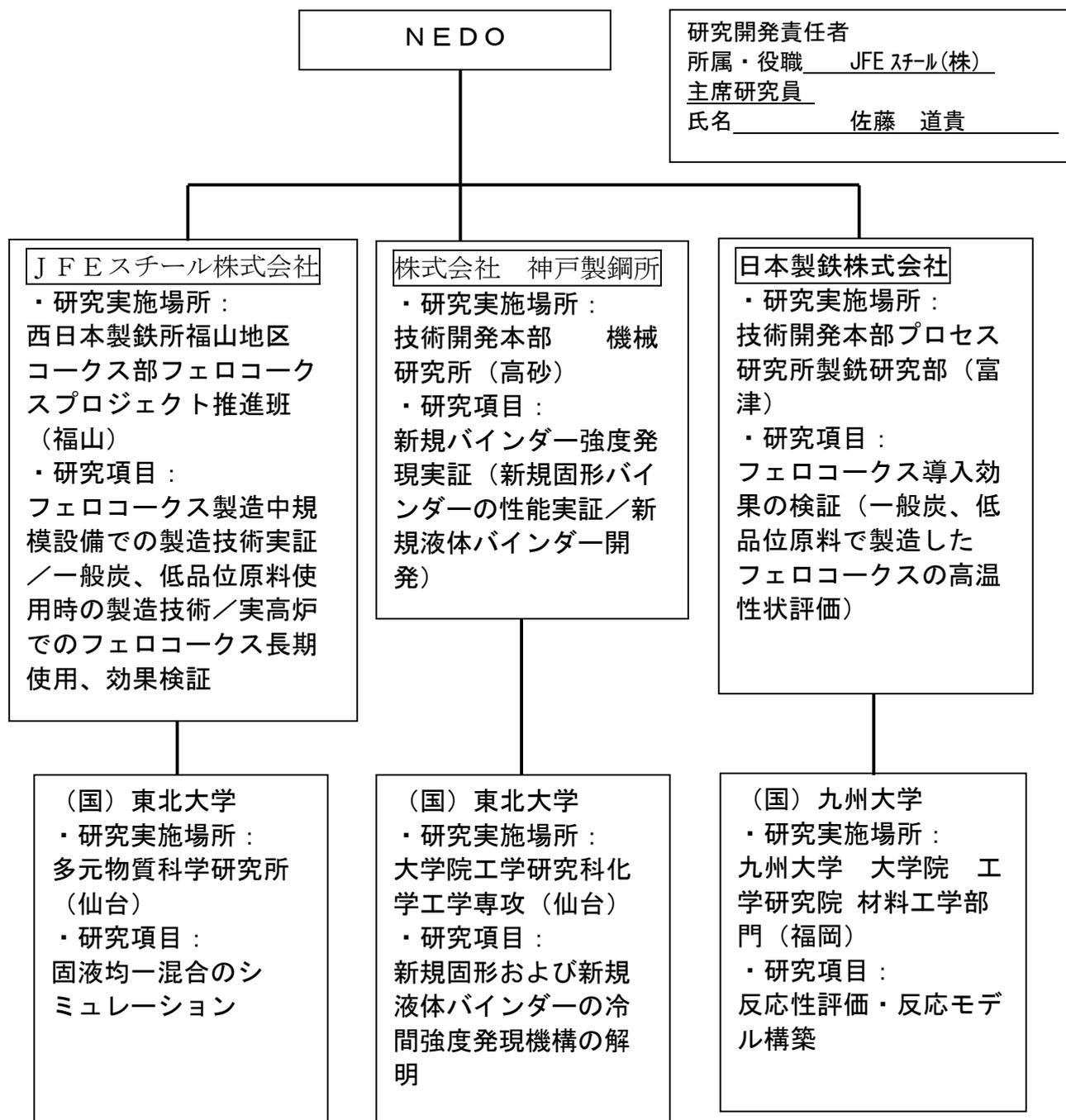


図2-3 研究開発体制

技術開発責任者 J F Eスチール（株） 佐藤道貴
J F Eスチール 神戸製鋼所 日本製鉄の各研究テーマの全体総括

J F Eスチール株式会社

担当開発課題

- ①フェロコークス中規模設備での製造実証
- ②一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証
- ③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

主要な研究者

- ・庵屋敦孝思 フェロコークスグループ責任者
- ・小柳保章 フェロコークスプロジェクト推進班長

共同研究先

国立大学法人東北大学

共同研究先の役割：筒液均一混合シミュレーション

株式会社神戸製鋼所

担当開発課題

- ④新規バインダー強度発現実証

固形新規バインダー開発

液体新規バインダー開発

主要な研究者

- ・宍戸貴洋 技術開発本部 機械研究所 エネルギー環境研究室 主任研究員
- ・奥山憲幸 技術開発本部 機械研究所 上席研究員

共同研究先

国立大学法人東北大学

共同研究先の役割：新規バインダー冷間強度発現機構の解明

日本製鉄株式会社

担当開発課題

- ⑤フェロコークス導入効果の検証

（一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状評価）

本プロジェクトにおける位置づけ

J F Eスチールで選定した一般炭、低品位鉄鉱石で作ったフェロコークスについて、荷重軟化試験を実施して、フェロコークスの高温性状を把握する。また、高炉内反応モデルシミュレーターを作成する。

主要な研究者

- ・中野 薫 技術開発本部 プロセス研究所 製鉄研究部 上席主幹研究員
- ・酒井 博 技術開発本部 プロセス研究所 製鉄研究部 主任研究員

共同研究先

国立大学法人九州大学

共同研究先の役割：高炉内におけるフェロコークスの反応性評価・反応モデル構築

2. 3 研究開発の運営管理

◎事業実施における運営方針、方法

1. 幹事会（事業者主催）とフェロコークス研究会を開催する。技術開発責任者を中心として提案者3社が集まり、プロジェクト幹事会、知財検討会などでプロジェクト推進に係る課題を打ち合わせる。

2. フェロコークス研究会（事業者主催） 開発進捗報告を事業者、共同研究先から報告。外部有識者であるアドバイザーより意見をもらう。

3. フェロコークス、COURSE50 事業者連携

同一基本計画の下にあるフェロコークスと COURSE50 については、2030 年以降、両者の相乗効果が期待される場所である。事業最終年度である 2022 年度においては、省エネルギー、省CO₂効果最大になる条件決定までに、解決すべき課題を明確にして連携を進める。

4. フェロコークス技術検討委員会（NEDO 主催）

1 回／四半期を目処に、NEDO がフェロコークス技術検討委員会を開催し、進捗状況を把握する。技術委員よりのコメントを研究開発内容へ反映させる。

フェロコークス技術検討委員会の開催実績

第1回委員会 2017年11月16日 NEDO

委員長 亀山 秀雄	国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久	学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
小野崎 正樹	一般財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長
武部 博倫	国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
巽 孝夫	国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット シニアコーディネーター
月橋 文孝	国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系 物質系専攻 教授

第2回委員会 2018年3月7日 NEDO

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
小野崎 正樹 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長
武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第3回委員会 2018年6月26日 新日鐵住金（当時） 君津

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第4回 2018年11月9日 神戸製鋼所 高砂

委員長 月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
小野崎 正樹 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長
武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第5回 2019年1月16日 JFEスチール 福山

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
小野崎 正樹 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長
武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授

巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
 月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
 科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第6回 2019年3月12日 NEDO

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
 伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
 小野崎 正樹 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長
 武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
 巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
 月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
 科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第7回 2019年7月26日 川崎 産業振興会館

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
 伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
 武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
 巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
 科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第8回 2019年12月13日 JFEスチール 福山

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
 伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
 巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
テクニカルコンサルタント
 月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
 科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第9回 2020年3月3日 書面開催

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
月橋 文孝 国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤科学研究系
物質系専攻 教授
科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント

第10回 2020年9月9日 JFE スチール 福山

委員長 亀山 秀雄 国立大学法人東京農工大学 名誉教授
伊藤 公久 学校法人早稲田大学 基幹理工学部 応用数理学科 教授
武部 博倫 国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科 物質生命工学専攻 教授
巽 孝夫 国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業ユニット
シニアコーディネーター
科野 宏典 株式会社野村総合研究所 社会システムコンサルティング部 上席コ
ンサルタント
葛西 栄輝 東北大学 大学院 環境科学研究科 先端環境創成学専攻 教授
佐々木 宏一 一般財団法人日本エネルギー経済研究所 環境ユニット
担任補佐/研究主幹

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1.1 概要

前プロジェクト（「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開」、2009～2012年度の4年間実施）で残された課題、すなわち、長期試験に基づく製造プロセス実証と高炉使用時の効果検証を目的として、パイロットの10倍規模となる中規模設備（300t/d）の建設を軸としたプロジェクトが2017年に発進し、2022年度までの6年間の予定で実施されている。

中規模設備の設備フロー、および研究課題（①～⑤）・分担を図口にまとめて示す。また、開発スケジュールを図口に示す。

「①中規模設備での製造技術実証」については、建設を2020年9月までに完了し、計画通り10月からは100t/dの連続操業へ移行予定である。

安価原料の使用拡大に関わる「②一般炭、低品位原料使用時の製造技術」は、今まで製鉄所では使いにくかった一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石1銘柄の選定を終え、今後の中規模設備での使用試験に備えていく。

「③大型高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証」についても10月からの高炉での連続使用（100t/d）に向け計画通りに進行している。

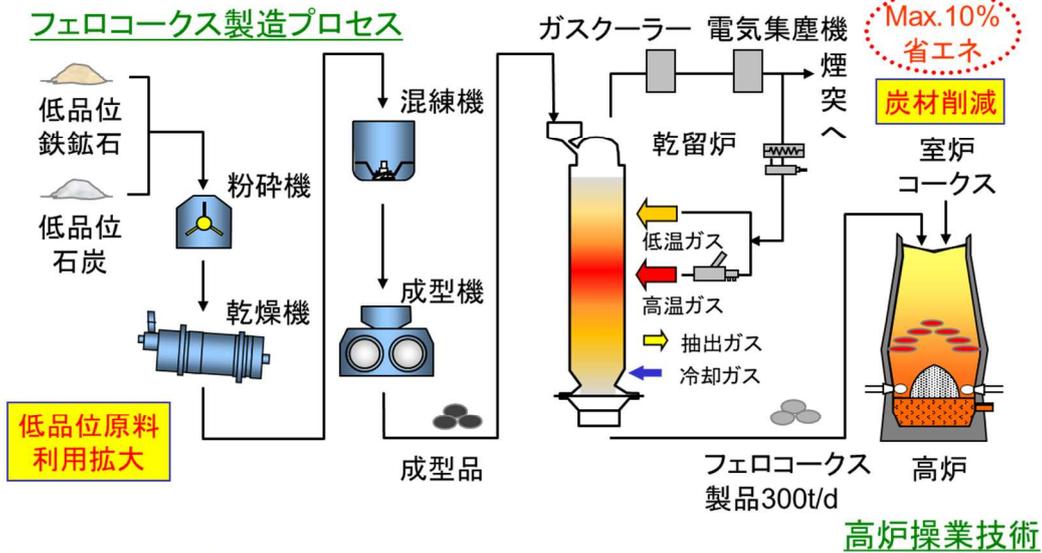
「④新バインダー強度発現実証」における新規固形バインダーの開発については、0.3トン／日にスケールアップした設備で製造できる目途を得るとともに、新規液体バインダーについても、フェロコークスタールの改質したバインダーを試作している。

「⑤フェロコークス導入効果の検証」では一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスを用い、その高温性状を調査するとともにフェロコークス反応モデルを構築し、両者の結果を反映した汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させた。今後は③の高炉での使用結果とも合わせ、解析精度アップを図っていく予定である。

以上のように、中間年度（2020年度）までほぼ計画通りに進行している。最終年度までには、最終目標である、フェロコークスの連続製造、高炉使用（30日以上）を達成するとともに、汎用高機能高炉内反応シミュレーターにより、製鉄プロセスにおける省エネ10%を検証していく予定である。併せて新規固形、液体バインダーについても工業的な製造プロセス案を提示する計画である。

①フェロコークス製造中規模設備(以降「中規模設備」)での製造技術実証
(JFEスチール・東北大)

③大型高炉でのフェロコークス
長期使用、効果検証
(JFEスチール)



②一般炭,低品位原料
使用時の製造技術
(JFEスチール)

④新バインダー強度発現
実証
(神戸製鋼所・東北大)

⑤フェロコークス導入効果
の検証
(日本製鉄・九大)

図3-1 中規模設備の設備フローと研究開発課題

技術開発項目	担当	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度
①中規模設備での製造技術実証	JFEスチール 東北大				100t/d 設計、建設	200t/d 製造実証	300t/d
②一般炭、低品位原料使用時の製造技術	JFEスチール				ラボスケール成型・乾留試験 成型条件		
③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証	JFEスチール				冷間装入試験	高炉使用・評価	
④新バインダーの強度発現実証	神戸製鋼所 東北大				<固形> ラボ検討 <液体> 性状分析 基礎調査	試作製造 評価	実プロセス検討
⑤フェロコークス導入効果の検証の確認	日本製鉄 九大				実験室規模 サンプル評価	中規模設備 サンプル評価	

図3-2 開発スケジュール

1.2 成果概要

1.2.1 中間目標と達成状況および最終目標の達成の可能性

表3-1 中間目標の達成状況と今後の課題と解決方針

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(1) 中規模設備での製造技術実証	①-1 中規模設備の開発	・原料事前処理設備、連続混練成型設備および乾留設備の据付完了し、乾留設備までの製造能力(300t/d)を確認する。	原料事前処理設備、連続混練成型設備および乾留設備の据付完了。新型コロナウイルス緊急事態宣言の発出により、負荷試運転が約2ヶ月の後ろ倒しになるも乾留設備までの製造能力(300t/d)を確認。	○	混練機スクリーフフィーダーの不具合(スクリーフに原料が固着し、モーター過負荷でトリップ)が生じ、緊急対策としてスクリーフピッチを広げたものと交換し連続成型を実施。300t/d連続操業に向けた恒久対策は、モーター容量アップを計画(今年度中に実施予定)。
(1) 中規模設備での製造技術実証	①-1-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立	・原料の均一混合技術の確立(固体3種類、液体1種類の混合): 混合度95以上(中規模設備で製造した混練物を評価し、確率50%で混合度95が達成できること)	成型物の強度測定結果から、目標強度80以上を確認。成型物強度と混合度の関係から、混合度95以上と推測。	○	

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(1) 中規模設備での製造技術実証	① -1-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークスのドラム強度※： DI150/15\geq80(ラボ乾留実験) (現状より劣質原料使用。中規模設備で混練成型した成型物を抜き出し、ラボの乾留炉で乾留した時に強度が確保できること。固形バインダー、液体バインダーは従来品使用) ※ドラム強度 DI150/15: JIS規格 	中規模設備で混練成型した成型物を抜き出し、ラボの乾留炉で乾留し、強度を確認(DI150/15 \geq 80をクリア)。	○	

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
① -2 固液均一混合のシミュレーション	・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを完成させる。	混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプは2019年度に完成。	○		

研究開発項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(2)一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証	<ul style="list-style-type: none"> ・選定した一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石1銘柄および従来品のバインダーを用いて、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認する(I型ドラム強度※: ID30/15\geq85)。 ※I型ドラム強度: 鉄鋼業界で一般的に採用されている強度指標測定に供する試料数: 20個 ・ラボにて④で製造した新規固形バインダー使用成型試験を実施し、強度評価を行う(液体バインダーは従来品使用)。 	<p>選定した一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石1銘柄および従来品のバインダーを用いて、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認した(I型ドラム強度: ID30/15\geq85)。</p> <p>ラボにて新規固形バインダー使用成型試験を実施し、強度評価を実施。</p>	○	

研究開発項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(3)実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ラボ装入模擬試験に基づきフェロコークスを実炉に装入するための適切な装入方法を提示確立する。 ・中規模設備で混練・成型・乾留したフェロコークスを実高炉へ装入量3kg/t程度で連続的に装入でき、かつ安定して操業(通気変動がないこと)できることを確認する。(フェロコークスの実高炉への装入量が平均3kg/t程度: 高炉の日常の炉熱変動の還元材比換算\pm約3kg/tの範囲内=高炉の商用生産に影響を与えない範囲) 	<p>ラボ装入模擬試験に基づきフェロコークスを実炉に装入するための適切な装入方法は、2019年度に完了。10月より100t/dの試験操業を開始、実高炉へ装入量3kg/t程度で連続的に装入でき、かつ安定して操業(通気変動がないこと)できることを確認</p>	○	

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(4)新バインダー強度発現実証	④-1 新規固形バインダーの性能実証	<ul style="list-style-type: none"> ・0.3トン/日にスケールアップした設備で新規固形バインダーを製造する。 ・製造した新規固形バインダー使用時の成型物の強度(I型ドラム強度:ID30/15\geq85)(ラボ成型実験)を確保する。 フェロコークスのドラム強度:DI150/15\geq80(ラボ乾留実験)を確保する。 	<p>工業的に最大の新規固形バインダー収率が得られる製造条件として、抽出温度380℃、昇温速度150℃/minを提示した。新規固形バインダー中の副生炭(RC)濃度を10%以下に規定した。ラボ試験炉において、成型物およびフェロコークスの強度目標を達成した。</p>	○	<p>新規固形バインダーを用いたフェロコークス製造試験の追加評価を実施し、必要であれば新規固形バインダーの製造条件の見直しを行う。ASPと新規固形バインダーの比較より、新規固形バインダーの強度向上メカニズムや優位性を明確にする。</p>

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(4)新バインダー強度発現実証	④-2 新規液体バインダー開発	<ul style="list-style-type: none"> ・中規模設備から得られたフェロコークスタールの化学構造や分子量分布を把握する。 ・試作した新規液体バインダーを用いた成型物の冷間強度をタブレットスケールで測定する。成型物の強度目標:割裂引張試験において、既存液体バインダー(SOP)と同等以上。上記結果に基づく新規液体バインダーの製造オプションを提示する。 	<p>軽質成分を多く含むフェロコークスタールの改質方法を提案し、液体バインダーの軟化点および粘度(成型温度範囲)をSOP並みに調製することで、SOPと同等の強度向上効果を有する新規液体バインダーを試作した。</p>	○	<p>中規模設備で製造されたフェロコークスタールの化学構造、分子量分布の評価および改質方針に沿った新規液体バインダーの試作を行う。新規液体バインダーを用いた成型物強度の評価結果に基づいて新規液体バインダーの製造オプションを提示する。</p>

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(4)新バインダー強度発現実証	④-3 新規固形および新規液体バインダーの冷間強度発現機構の解明	・圧縮成型時の石炭-バインダー-鉄鉱石の圧縮挙動予測モデルを構築し、フェロコークスに適したバインダーの添加条件を提案する。モデル解析結果の誤差:10%以内。	石炭-バインダー共存ケースの圧縮挙動予測モデルを構築した。実験結果とモデル解析の比較を通してモデルの予測精度の向上を目指すとともに石炭-バインダー-鉄鉱石共存ケースの圧縮挙動予測モデルを構築する。	○	鉄鉱石や液体バインダーを含む成型物の実験データの取得を神戸製鋼と共同で進め、石炭-バインダー-鉄鉱石が共存する圧縮挙動予測モデルを構築する。

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(5)フェロコークス導入効果の検証	⑤-1 一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状評価	・⑤-1 で得られた高温性状調査結果と⑤-2 で得られたフェロコークス反応モデルを反映した、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させ、ケーススタディによる物質収支誤差が許容範囲(1%程度)であることを確認する。	一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状を調査し、温度とガス化率の関係を評価した。また、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させ、ケーススタディを実施した。	○	一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状を調査し、温度とガス化率の関係を評価する。また、汎用高機能高炉内反応シミュレータに⑤-2 で得られた知見を反映し、ケーススタディを実施し、物質収支誤差が許容範囲であることを確認することで、達成

					できる見込み (2021年2月達成見込み)。
--	--	--	--	--	---------------------------

研究開発項目		中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
(5)フェロコークス導入効果の検証	⑤-2 反応性評価・反応モデル構築	・⑤-1で得られた高温性状調査結果と⑤-2で得られたフェロコークス反応モデルを反映した、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させ、ケーススタディによる物質収支誤差が許容範囲(1%程度)であることを確認する。	一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、測定した反応速度をアレニウス型反応速度式として定式化し、フェロコークス製造条件が頻度因子活性化エネルギーに及ぼす影響を評価した。	○	

表 3 - 2 研究成果の最終目標の達成可能性

研究開発項目		現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
(1) 中規模設備での製造技術実証	①-1 中規模設備の開発	原料事前処理設備、連続混練成型設備および乾留設備の据付完了。新型コロナウイルス緊急事態宣言の発出により、負荷試運転が約 2 ヶ月の後ろ倒しになるも乾留設備までの製造能力 (300t/d) を確認。	<ul style="list-style-type: none"> 原料の均一混合技術の確立 (固体 3 種類、液体 1 種類の混合): 混合度 95 以上 (中規模設備で製造した混練物を評価し、確率 100% で混合度 95 が達成できること) フェロコークスのドラム強度※: DI150/15 \geq 80 (中規模設備) (現状より劣質原料使用時に強度確保) 	中規模設備の生産量 300t/d での連続運転を実施し、結果の解析を実施することで、目標を達成する見通し。
	① -1-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立	成型物の強度測定結果から、目標強度 80 以上を確認。成型物強度と混合度の関係から、混合度 95 以上と推測。		

研究開発項目		現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
(1) 中規模設備での製造技術実証	① -1-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立	中規模設備で混練成型した成型物を抜き出し、ラボの乾留炉で乾留し、強度を確認 (DI150/15 \geq 80 をクリアー)。	<ul style="list-style-type: none"> ④で製造した新規固形バインダー使用、液体バインダーは従来品使用) ※ドラム強度 DI150/15: JIS 規格 	
	① -2 固液均一混合のシミュレーション	混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプは 2019 年度に完成。		

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(2)一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証	<p>選定した一般炭 2 銘柄および低品位鉄鉱石 1 銘柄および従来品のバインダーを用いて、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認した(I型ドラム強度: ID30/15\geq85)。 ラボにて新規固形バインダー使用成型試験を実施し、強度評価を実施。</p>	<p>・成型物の強度※(I型ドラム強度): ID30/15\geq85(中規模設備) ※鉄鋼業界で一般的に採用されている強度指標 測定に供する試料数: 20 個 (現状より劣質原料使用時に強度確保。④で製造した新規固形バインダー使用、液体バインダーは従来品使用)</p>	<p>ラボスケールにおける原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みについては完了。 これら原料を中規模設備において使用試験を実施し、フェロコークス用原料として適していることを検証する見込み。</p>

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(3)実高炉でのフェロコークス長期使用効果検証	<p>ラボ装入模擬試験に基づきフェロコークスを実炉に装入するための適切な装入方法は、2019年度に完了。 10月より100t/dの試験操業を開始、実高炉へ装入量3kg/t程度で連続的に装入でき、かつ安定して操業(通気変動がないこと)できることを確認。</p>	<p>・連続操業試験: 30日以上(装入量: 平均27kg/t(稼働率90%))(高炉の還元材比、通気性の変化を確認)</p>	<p>混錬機スクリーフィーダーの不具合(スクリーに原料が固着し、モーター過負荷でトリップ)が生じ応急対策としてスクリーピッチを広げたものと交換し連続成型を実施。300t/d連続操業に向けた恒久対策として、モーター容量アップを実施(今年度中に実施予定)するため、連続操業試験30日以上を達成する見通し。</p>

研究開発項目		現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(4)新バインダー強度発現実証	④-1 新規固形バインダーの性能実証	工業的に最大の新規固形バインダー収率が得られる製造条件として、抽出温度380℃、昇温速度150℃/min、滞留時間40分を提示した。既存固形バインダー(ASP)と同等以上の強度向上効果を達成可能な新規固形バインダー中の副生炭(RC)濃度を10%以下に規定した。また新規固形バインダーを用いたラボ試験炉による製造評価(JFEスチール)において、成型物およびフェロコークスの強度目標を達成した(20年度追加評価を実施中)。	・新規固形バインダー使用時の成型物の強度(I型ドラム強度):ID30/15 \geq 85(中規模設備)。 (作り溜めした上で、中規模の混練・成型機に数バッチ分投入し、成型物のI型強度を測定する。成型品は乾留炉、高炉に投入。ただし、量が少ないため、乾留後強度、高炉評価はできない)	新規固形バインダーを用いて製造した成型物・フェロコークスの目標強度については、当社小型炉評価およびラボ試験炉評価(JFEスチール)において確認済み。中規模設備投入前の条件設定についてJFEスチール側と協議して実施することで最終目標を達成する。

研究開発項目		現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(4)新バインダー強度発現実証	④-2 新規液体バインダー開発	軽質成分を多く含むフェロコークスタールの改質方法として、低沸点成分除去法や重質成分との混合熱処理法、混合抽出法を提案し、液体バインダーの軟化点および粘度(成型温度範囲)をSOP並みに調製することで、SOPと同等の強度向上効果を有する新規液体バインダーを製造した(フェロコークスタールを入手するまでの代替品としてコールタールを使用)。	・新規固形バインダー使用時のフェロコークスのドラム強度※:DI150/15 \geq 80(中規模設備) ・従来と同等の強度を実現し得る新規液体バインダーの製造プロセス案を提示する。	提案した低沸点成分除去法や重質成分との混合熱処理法、混合抽出改質法の何れも改質(重質化)が可能であることを確認しており、試作品を用いた成型物の強度評価より、SOP代替となる性能を有する新規液体バインダーの改質方針を決定した。21年度に試作品を用いたタブレットによる強度評価(JFEスチール)に基づき製造条件の最適化を進め、新規液体バインダーの製造プロセス案に反映させることで最終目標を達成する。

研究開発項目		現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(4)新バインダー強度発現実証	④-3 新規固形および新規液体バインダーの冷間強度発現機構の解明	石炭-バインダー共存ケースにおいて、圧縮応力の実験値との誤差が10%以内となる圧縮挙動予測モデルを構築した。実験結果とモデル解析の比較を通してモデルの予測精度の向上を目指すとともに石炭-バインダー-鉄鉱石共存ケースの圧縮挙動の予測モデルを構築する。	・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルの最適化を行い、工業的に低負荷となるフェロコークスの圧縮成型条件を提案する。モデル解析結果の誤差:10%以内。	離散要素法をベースとした圧縮挙動の予測モデルの高精度化は達成見込みである。成型物の構造を高精度で予測できれば、冷間強度の推算についてもモデルの構築ならびにモデルパラメーターのチューニングにより最終目標を達成できる見込みである。

研究開発項目		現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
(5)フェロコークス導入効果の検証	⑤-1 一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状評価 ⑤-2 反応性評価・反応モデル構築	一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状を調査し、温度とガス化率の関係を評価した。また、汎用高機能高炉内反応シミュレータの試作品を完成させ、ケーススタディを実施した。 一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、測定した反応速度をアレニウス型反応速度式として定式化し、フェロコークス製造条件が頻度因子、活性化エネルギーに及ぼす影響を評価した。	・評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認 (⑤-1の数値シミュレーションと③(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の製鉄プロセスにおける省エネ10%を検証する)。	フェロコークス製造条件が頻度因子、活性化エネルギーに及ぼす影響を評価し、その知見を⑤-1の汎用高機能高炉内反応シミュレータに適用し、評価方法を確立する。また、③(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果を汎用高機能高炉内反応シミュレータを用いて解析することで、省エネ効果を確認し、最終目標を達成できる見通し。

1.2.2 知的財産等の成果概要

【成果の普及】

表 には 2020 年 10 月末段階での研究開発成果（成果発表）を示す

表 3 - 3 研究開発成果（成果発表）

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	計
論文	0	0	4	1			5
研究発表・講演	0	3	9	2			14
受賞実績	0	0	0	0			0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	11			11
展示会への出展	1	1	1	0			3

※2020 年 10 月 31 日現在

代表的な論文は以下の通りである。

○西山記念技術講座（第 239・240 回）、（一社）日本鉄鋼協会 2019 年度 10 月掲載

「製鉄プロセスの新たな取り組み（国プロを中心として）」

○JFE 技報 No. 45 2020 年度 2 月 掲載

「データ同化法によるフェロコークス乾留炉ヒートパターン制御」

○粉体技術（（一社）日本粉体工業技術協会） 2020 年度 10 月 掲載

「製鉄プロセスの新たな取り組み」

代表的な口頭発表は以下の通りである。

○2018 年度 12 月 （独）日本学術振興会学振 54 委（平成 30 年度 12 月期：第 193 回）

「フェロコークス製造・利用技術のこれまでの開発経緯と今後の展開」

○2019 年度 6 月 World Steel Association Technology Committee Meeting

「CO2 Reduction Technology of JFE Steel」

○2019 年度 9 月 日本鉄鋼協会第 178 回秋季講演大会

「環境調和型プロセス技術の開発／フェロコークス技術の開発」

【知的財産権の確保に向けた取組】

表には2020年10月末段階での研究開発成果（特許出願）を示す。

表3-4 研究開発成果（特許出願）

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	計
特許出願(うち外国出願)	0	0	0	1(0)			1(0)

※2020年10月31日現在

戦略に沿った具体的取組状況としては、これまでの国プロでの活動を踏まえつつ、継続的に特許出願を行う

○技術封印：先導研究（「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」）（'06～'08年度）

開始前に実施。

○特許網構築：「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」（'09～'10年度 NEDO、'11～'12は国直轄）において実施。

○新規知的財産権：中規模設備固有のプロセス・設備、使用原料に関する特許出願

2. 研究開発項目毎の成果

課題1. フェロコークス製造中規模設備（以下「中規模設備」という。）での製造技術実証

①-1 中規模設備の開発

【目標】

2017年度 基礎工事：原料乾燥～乾留・ガス処理設備に至る300t/dフェロコークス製造設備の架構および機械設備の杭打ち工事、並びに基礎工事(コンクリート打設)までを完了する。

2018年度 原料予備処理設備の搬送コンベア・配管を除く、詳細設計、機器製作を完了する。

2019年度 300t/dフェロコークス製造設備の機器の据付け、配管工事を完了する。

2020年度 試運転を完了し、操業試験を実施する。

【成果】

300t/dフェロコークス製造中規模設備は、JFEスチール西日本製鉄所福山地区の第2号焼結工場（休止設備）跡地に建設する。基礎工事に取りかかる前に既設基礎、埋設ケーブルの撤去工事を実施した。また、電気室は休止中焼結工場の建屋を流用し不要な電気品等を撤去した。撤去工事は、2017年12月4日から開始し年内に終了、年明け1月5日から杭打ち工事を開始し、2月9日に約350本の杭打ちを完了した。杭打ち工事と並行して、1月10日から基礎工事を開始した。

基礎工事は、設備パートを6ブロックに分けて施工し、3月27日までに冷却塔基礎を除く、17年度分基礎工事を完了した。2018年度は、原料ヤード、共通ケーブルラック架構および危険物設備の基礎工事を行ない、5月

21日に躯体工事を完了した冷却塔基礎工事は、8月21日から杭打工事を着工し、9月3日から躯体工事に取りかかり10月末に完了した。フェロコックス製造設備敷地外では、高炉装入設備の据付工事の事前工事として、7月30日から既存設備（ホッパー類、スキップコンベア、フィーダー、架構等）の撤去、また、11月より土木基礎工事を開始し、3月18日に完工し、原料予備処理設備の搬送コンベア・配管を除く、詳細設計、機器製作を完了、成型設備はホッパー等付帯設備を除く詳細設計、機器製作を完了、乾留設備はガス処理設備を除く、乾留設備本体の詳細設計、機器製作を完了した。2019年度11月末、主要装置の据付工事は概ね完了（図3-3参照）。2020年2月末時点で、乾留設備の塗装・保温、配管工事、配線工事を実施。プラント全体の機械、制御の据付工事は予定通り、2020年度内に完了。

高炉投入設備に関しては、2018年12月の休風に合わせ、投入シュートの据付工事を実施し、12月17日から土木基礎工事を開始し、3月18日に完了。その後、架台、秤量ホッパー、切出しフィーダーの据付を行い、11月20日に据付工事を完了。



図3-3 300t/dフェロコックス製造中規模設備 工事全景

当初実施計画では、2020年4月から試運転を実施する予定であったが、高炉投入設備の据付工事が12月に完了したため、12月23～25日に高炉投入設備の無負荷単独試運転を実施し、翌1月23～24日の高炉休風に合わせて、システムの改造および無負荷連動試運転を行い、無負荷での試運転を完了した。高炉投入設備の試運転を皮切りに、1月20～24日に間接冷却設備、1/28～29日に石炭垂直コンベアと順次、無負荷試運転を前倒しで実施し、4月下旬より負荷試運転を開始し、9月下旬に完了した。

①-1-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立（JFEスチール（株））

【目標】

2017年度 750L級の「30トン/日パイロットプラント」の知見を活用して、原料の予備処理設備の設計と4,000L級にスケールアップした連続混練成型設備の基本設計までを完了する。

- 2018年度 原料予備処理設備の搬送コンベア・配管を除く、詳細設計、機器製作を完了し、4,000L級混練成型設備のホッパー等付帯設備を除く詳細設計、機器製作を完了する。
- 2019年度 原料予備処理設備および4,000L級混練成型設備の建設と据付を完了する。
- 2020年度 原料事前処理設備および連続混練成型設備の据付完了し、据え付けた原料予備処理設備および混練成型設備について、設備能力（300t/d）・稼働率等、設備耐久性（攪拌羽根、成型ロールの磨耗状況）等の実証を行う。原料（固体3種類、液体1種類の混合）の混合度95以上を確認する。

【成果】

30t/日パイロットプラントでは、鉱石はプラント外で粉碎・乾燥を実施し、石炭は、ヤード原料をプラント内で粉碎・乾燥を実施した。鉱石は1種類のみであったため、プラント内には石炭専用の粉碎機、乾燥機を設置した。中規模プラントでは、鉱石は同じく1種類であるがプラント内で粉碎・乾燥を実施する。石炭は2種類使用し、HGI（石炭の硬さ）が異なるためそれぞれ別々のラインを設けることとした。また、鉱石および石炭は乾燥前後で貯留ホッパーでの流動性が異なり、乾燥後は大きい粒子が先に排出され小さい粒子が後に排出される現象が顕著となる。粒度が異なる原料が成型機に送り込まれることで成型圧が変動し、成型物強度にバラツキが生じる。この原料の偏析抑止のため、乾燥後のホッパーサイズを小さくし、且つ、成型前の混練機で必要な1バッチ分を搬送するシステムとした。更に、発火防止のため石炭乾燥機には、蒸気間接加熱のSTD（Steam in tube dryer）を採用し、雰囲気酸素濃度が1%以下になるような対策を施した。

粉碎機は、バインダー、石炭、鉱石それぞれ硬さが異なる、また、水分の影響で供給・排出部への居着きが問題となるため、様々な型式で粉碎試験を実施（図3-4）し、各原料に適応した機種を選定した。混練・成型設備は、偏析抑制のためのバッチ搬送、成型圧安定操業のための原料供給装置さらに紛体圧による亀裂発生抑制のための成型物冷却装置などを基本設計に反映させた。

原料予備処理設備（石炭粉碎乾燥および鉱石粉碎乾燥）は、石炭架構を2019年2月5日から、また、鉱石架構を2019年3月8日から建て方を開始し、成型設備の成型架構は2019年3月23日から建て方を開始した。GLから順次機器の据付工事を行い、11月末までに主要装置の据付工事は概ね完了した。

型式	スイングハンマーミル	ピンミル	ケージミル(ピンミル)
原理			
	回転するハンマーの衝撃で破碎	回転するピンの衝撃で破碎	
粒度	粗い	細かい	細かい
居着き	供給部:なし 排出部:あり	供給部:あり 排出部:なし	供給部:あり 排出部:なし
コスト	高価	安価	高価

図3-4 粉砕機の型式と特徴

混合・攪拌シミュレーションモデルにおいては、共研先である東北大で粒子径4000L規模の混合・攪拌シミュレーションモデルを実施するため独自コードの取り扱い粒子数の増加と計算時間の短縮を目的として並列化処理に対応するための改造を行うとともに、DEMコードの改良や粗粒解析から実粒径における混同速度の推定方法の開発を実施。バインダー粒子に付着力を導入した解析を実施し、混合実験で確認できた原料表層挙動との比較を行った。付着力を与えなかった解析ではタール・SOP投入前の実験と同様に石灰粒子は回転中に向かって螺旋状に引き込まれている。また、付着力を与えた解析ではタール・SOP投入後の実験と同様に石灰粒子は回転中心には引き込まれず、外周部に滞留している。以上から付着性原料による原料混合挙動を解析上で再現出来ていることを確認(図3-5)。混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを構築した。

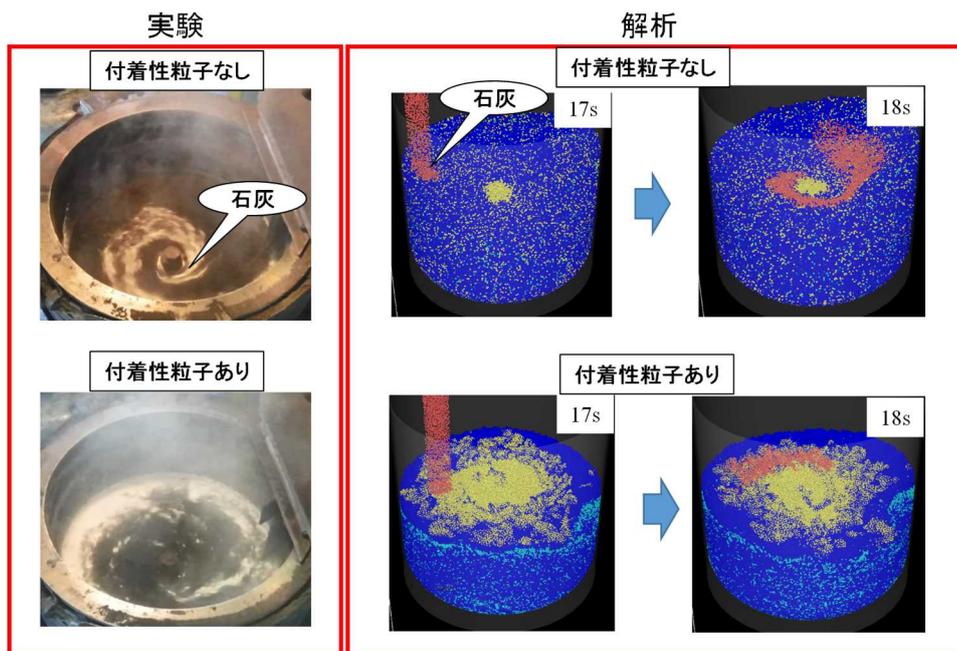


図3-5 実験挙動と解析挙動の比較

①-1-2 複数本羽口を有する規模設備での乾留技術の確立

【目標】

2017年度 「30トン/日パイロットプラント」（1列羽口）の知見を活用した、長期操業に耐えうる中規模設備を構成するスケールアップ乾留設備（4～5列羽口）（ダスト・タールの多量発生に対応したガス処理系も含む）の設計を行う。

2018年度 ガス処理設備を除く、乾留設備本体の詳細設計、機器製作を完了する。

2019年度 設計に基づく当該乾留設備の建設、据付を完了させる。

- 2020年度
- ・ 乾留設備の据付完了し、乾留設備の製造能力（300t/d）を確認する。
 - ・ 原料事前処理設備、連続混練成型設備および乾留設備の据付完了後、連続操業を模擬した負荷運転を行う。その後、操業試験により設備の長期間稼働安定性や耐久性（シール弁、断熱材の劣化等）課題を抽出する。
 - ・ 中規設備で用いる原料と同一原料でラボ乾留実験を行い、フェロコークスのドラム強度： $DI150/15 \geq 80$ （ラボ実験）を確認する。
 - ・ ガス処理系において発生ガス、ダスト・タールの長期間安定処理（排ガスから効率的にダスト・タールが分離でき、かつ配管閉塞がないことなど）ができることを確認する。
 - ・ 新規液体バインダー開発のため、ガス処理系で凝縮されたフェロコークスタールを提供する。

【成果】

乾留炉は、「30トン/日パイロットプラント」（1列羽口）の知見を活用し、長期操業に耐えうる中規模設備を構成するスケールアップ乾留設備（4列羽口）（ダスト・タールの多量発生に対応したガス処理系も含む）の設計を行った。

乾留炉の炉内温度は上部の低温羽口、中央部の高温羽口、下部の冷却羽口と中央部と下部の間に位置する抽出羽口の吹込みガス温度、流量により制御する。低温～高温羽口間で成型物の乾留と還元を促進させ、抽出～冷却間で乾留されたフェロコークスの温度を約80℃前後まで冷却する。冷却羽口からは、炉頂から発生する循環ガスをガス処理設備でダスト・タールミストを取り除き、約40℃程度まで冷却された循環ガスを吹込み、その上部の抽出羽口から抜き取る。抜き取られたガスは、低温、高温羽口へ送風され、加熱媒体として再利用する。この4種類の羽口の温度・流量により形成される炉内ヒートパターンがフェロコークス性状を左右する。

再利用される循環ガス中のダストおよびタールはダクト内の閉塞の要因となるため、ガス処理設備で安水噴霧によりタールミストを除去し、電気集塵機によりダスト除去する(図3-6)。このガス処理設備でのダストおよびタールの除去が設備の長期安定稼働を左右する。

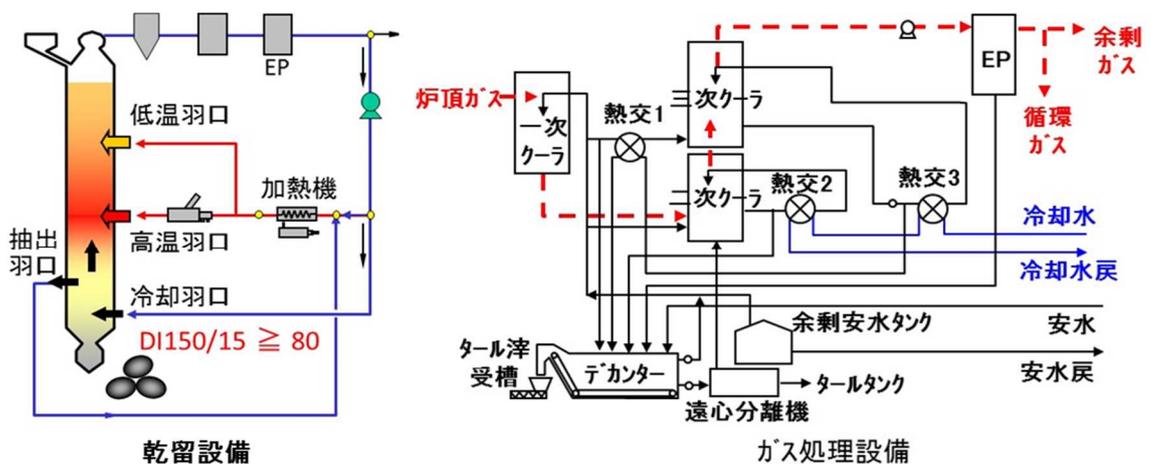


図3-6 乾留・ガス処理設備の概要

乾留炉では、4種類の羽口の温度・流量により形成される炉内ヒートパターンがフェロコークス性状を左右するが、そのためには各羽口に送られるガス温度が重要となる。ガス処理設備でダスト・タールミストを取り除かれた循環ガスは、循環ガス加熱器で650℃前後に加熱され、断熱材を施したダクト配管で低温・高温羽口に送られる。高温羽口には燃焼バーナーを備えており、燃焼バーナー用空気は空気加熱器で加熱し送り込まれる。ダクト配管はガス加熱器の出口から羽口まで約50mにおよぶものもあり、ヒートロスによるガス温度低下は非常に重要な問題である。ダクト配管の断熱材の選定にあたっては、「30トン/日パイロットプラント」の知見を活用し、加熱器出側ガス温度と羽口付近のガス温度の実績値と同じ配管径で作成した数種類のダクト配管の各ヒートロス測定し、断熱材の設定を行った。

①-2 固液均一混合のシミュレーション

【目標】

2017年度 ・離散要素法 (DEM; Discrete Element Method) に基づく混合・攪拌シミュレーションモデル構築のために、数十Lオーダーの混練冷間装置を作成し、混練状態を把握するための実験を行う。

・DEM法に基づく混合・攪拌シミュレーションモデルの構築に着手する。

1) 互いに接触した粒子間に働く接触力をモデル化

2) 接触力が作用する個々の粒子の運動を記述する運動方程式を数値計算

3) 粉体中の個々の粒子の挙動を追跡

2018年度 攪拌・混合理論を構築と実験対比による混合・攪拌シミュレーションモデルの高精度化を実施（実際の物の動きをDEMにより再現するため、シミュレーションモデルに設定した各種パラメータを調整すること）する

2019年度 ・混練による固液均一混合に関しては、旋回流、上下動流等の物の動きを再現し、均一混合に適した、攪拌羽根の形状を提案する。

・解析速度のスピードアップを図るため、GPU計算機の増強を行い、粒子数1000万個弱（現状の約4倍）で、かつ粒子径を細粒化した条件でのシミュレーションを可能とする実機4000 L混練（混合挙動）DEM解析モデルのプロトタイプを完成させる。

2020年度 ・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを完成させ、混合均一性の計算ができることを確認する。

・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを用い、運転条件とのすり合わせに着手する。

【成果】

試験混合機と同形状混合羽根による混合シミュレーションの混合挙動確認のために、75 L 試験混合機を使用し混合試験を実施。混合試験から投入された石灰は、渦を巻くように中心部から底部に向かって分散されていることが分かる。混合が進むと外側から石灰が現れ、再び中心部に向かって渦を巻くように分散されていく様子が確認できた。シミュレーションにおいても、初期状態において最上部にある赤色粒子が底面に向かって分散されていき、混合が進むと外側から混合粉体層表面に向かう挙動を確認することができた。この結果から、シミュレーションにより混合試験と同様の混合挙動を再現できるものと考えられる。



図3-7 試験機による混練状況

混合試験機での粉体混合挙動を確認し、同形状混合羽根による混合シミュレーションを行った。石灰を使用した混合試験で確認された混合挙動をシミュレーションでも表現可能と考えられる。また、混合試験で用いられるバインダーの効果をシミュレーションにおいて付着力モデルを導入することで表現し、混合・攪拌シミュレーションモデルを構築した。

課題② 一般炭、低品位原料使用時の製造技術

【目標】

- 2017年度 石炭・鉄鉱石から最低2種類の銘柄を選択し、実際に実験室規模での混練（75L）、成型（φ650mm）を行い、成型後の歩留り・強度を評価する。
- 2018年度 ・実験室で製造した成型物を乾留容器に装入し、乾留を行い（1000℃、6～7時間）、乾留後の試料の性状評価（フェロコークス同士の融着性、対圧壊強度、反応性等）を行う。
・長期操業試験用原料（石炭、鉄鉱石）（融着しないこと）。
- 2019年度 ・中規模設備で使用可能（成型物の強度（I型ドラム強度）：ID30/15 \geq 85（ラボ実験）を満足）な一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石2銘柄の選定を完了する。
・一般炭と低品位鉄鉱石、および④で製造した新規固形バインダーを用い、ラボスケールの成型試験を行い、各配合比率等の成型条件を確立する。
・鉄鉱石の銘柄拡大のため、豪・伯と言った主要産出国に捉われない産出国（銘柄）の調査およびサンプル評価（成型・乾留試験および成型物、フェロコークスの性状評価）を行い、利用技術を確立する。
- 2020年度 ・選定した一般炭2銘柄、低品位鉄鉱石1銘柄および従来のバインダーを使用し、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認する（I型ドラム強度：ID30/15 \geq 85）。
・ラボでの新規固形バインダー使用成型試験を実施し強度評価を行う。

【成果】

低品位原料の配合構成は、成型物および乾留後のフェロコークス双方の品質に影響を及ぼすと考えられる。まず、成型物の品質として、強度および歩留りに及ぼす低品位炭の配合構成の影響を調査した。一般炭として炭化度 \bar{R}_o が0.7程度の低 \bar{R}_o 炭、PCI炭としては \bar{R}_o が1.2程度と原料炭並みであるが、MFの低いものを使用した。また、鉱石としてはピソライト鉱石を使用した。低品位炭重量（一般炭とPC炭の合計重量）と鉱石重量の比は7:3で固定し、低品位炭中の一般炭の比率が0 wt%、30 wt%、50 wt%となるように3種の配合炭を調製した。これにアスファルトピッチを添加後、それぞれヘンシェル型の高速攪拌機内で混練しながら加熱した。混練中に所定の温度にてコールタールおよびソフトピッチ（SOP）を添加し、原料温度が160℃となった時点で混練を完了し、高速攪拌機より原料を排出した。混練原料中のASP、タール、SOPの比率はそれぞれ2.0 wt%、2.4 wt%、3.6 wt%、全原料の合計重量を20kgとした。混練後の原料をダブルロール型の高圧成型機を用いて成型し、サイズが6ccの成型物とした。成型後の全原料中の15mm以上の割合を成型物歩留りとし、低品位炭の配合構成の影響を評価した。また、成型物の強度として、I型強度を測定し、ID(30/15)と低品位炭配合構成の関係を調査した。

一般炭は6銘柄、PCI炭は3銘柄、鉄鉱石は2銘柄を用いて評価を行い、その結果、一般炭4銘柄、PCI炭3銘柄、鉄鉱石2銘柄が使用可能であることを確認した。2020年度の負荷試運転では、上記の結果を踏まえて原料の選定を行い、300t/d規模でのフェロコークスの製造を実施した。

課題③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証（JFE スチール）

【目標】

- 2017年度 高炉装入を想定した冷間でのラボ装入模擬試験（※）の検討に着手する。
- 2010年度 1/18 ラボ装入模擬試験に基づきフェロコークス分布の制御性と再現性に優れた実高炉向けの装入方法の探索を行う（H29年度から継続）。高炉装入条件（装入速度、シュート角度、旋回数）の適正化（フェロコークスの径方向に均一な分布を目標）に着手する。

- 2019 年度
- ・高炉装入設備の付帯設備・配管を除く、機器製作を完了する。
 - ・高炉装入条件（装入速度、シュート角度、回転数）の適正化（フェロコークスの径方向に均一な分布を目標）を図る。
- 2020 年度
- ・ラボ装入模擬試験に基づきフェロコークスを実炉に装入するための適切な装入方法を提示する。
 - ・フェロコークスの高炉への装入設備の設置を完了させるとともに、上記装入設備を用い、フェロコークスの実高炉への装入量 3kg/t 程度（高炉の日常の炉熱変動の還元材比換算±約 3kg/t の範囲内＝高炉の商用生産に影響を与えない範囲）で連続的に装入でき、かつ安定して操業（通気変動がないこと）できることを確認し、生産量 100t/d で 1 週間の試験操業を 5 回以上実施する。

【成果】

フェロコークスの適正な装入方法をラボ装入模型試験に基づき提示することを目的とし、1/18 ラボ装入模擬試験（図 3-8）に基づきフェロコークス分布の制御性と再現性に優れた実高炉向けの装入方法の探索のため、高炉装入条件（シュート角度、装入速度、回転数）の適正化および装入ベルトコンベア上でのフェロコークス積み付け状態の適正化の検討を行った。

その結果、シュート角度の傾動方法を検討した結果、順傾動装入より逆傾動装入の方がフェロコークスの径方向混合率分布が均一になることが分かった。また、装入速度、回転数を変更して試験を行った結果、回転数を少なくし、装入速度を大きくした方が、フェロコークスの径方向混合率分布が均一になることが分かった。更に、装入ベルトコンベア上における鉱石上へのフェロコークスの重ね方を検討した結果、炉内への排出時の混合率分布は、フェロコークスを鉱石上の少なくとも半分より後方に重ねた場合に、均一に近づくことが分かった。

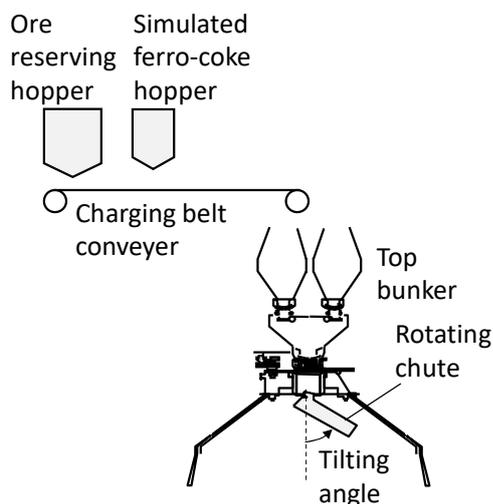


図 3-8 1/18 ラボ装入模擬試験装置

課題④ 新バインダーの強度発現実証

④-1 新規固形バインダーの性能実証

【目標】

- 2017 年度 本事業では0.3トン/日にスケールアップした設備で、抽出温度や時間等、所定の条件で運転が可能かバインダー試作上の課題と対策の抽出を行う。
- 2018 年度 所定性状の新規固形バインダーを中規模設備試験での必要量（数トン規模）を試作するための石炭処理条件（原料石炭種、抽出条件（温度、滞留時間等）等）を提示する。
- 2019 年度 中規模設備に供給するための新規固形バインダーの試作を行うとともにラボスケール成型試験用のバインダーサンプルを提供する。ラボスケールで製造したフェロコークスの冷間強度評価を行い、バインダー特性とフェロコークスの強度の関係を明らかにする。フェロコークスの強度目標：割裂引張試験において既存固形バインダー（ASP）と同等以上。
- 2020 年度 新規固形バインダーの試作を継続し、下記の成型物、フェロコークスの強度目標を達成できる新規固形バインダーの製造条件を確立する。ラボ乾留試験用として新規固形バインダーを提供する（20kg 程度）。成型物の強度目標：（I 型ドラム強度）ID30/15 \geq 85、フェロコークスの強度目標：DI150/15 \geq 80

【成果】

④-1 の「新規固形バインダーの性能実証」では、フェロコークスで使用されている既存固形バインダー（アスファルトピッチ：以下 ASP と称す）の代替となる新規固形バインダーの製造条件の確立と実証を目的としている。0.3トン/日にスケールアップした連続製造設備（Bench Scale Unit 以下、BSU と称す）にて、新規固形バインダーを工業的に高収率で製造するための課題や対策を検討するとともに新規固形バインダーの抽出条件と収率の関係について調べた。また製造時に新規固形バインダーに混入する副生炭濃度と配合時の強度向上効果について調べ、ASP と比較することで新規固形バインダー中の副生炭の許容濃度について検討した。抽出条件の検討では、オートクレーブを用いて抽出温度（380℃、400℃、420℃）および昇温速度（3℃/min、10℃/min、150℃/min）を変更して新規固形バインダーの試作試験を行った。

結果、抽出温度は 400℃、昇温速度は 150℃/min 条件において最大の高い収率が認められた。一方で 0.3t/d の連続製造設備（BSU）の製造条件として適用する際に考えられるリスクの検討より、400℃以上の高温抽出条件では抽出槽におけるヒーターのキャパシティーの制約から、石炭/溶剤スラリーの流量を低下させる必要があり、スラリー配管でのコーキングに伴う閉塞や生産性の低下などのリスクを抽出した。

従って工業的に高収率で新規固形バインダーを製造するための条件として、抽出温度 380℃、昇温速度 150℃/min を提示した。新規固形バインダー中に混入する副生炭の許容濃度は、BUS で製造した副生炭濃度の異なる複数の新規固形バインダー（副生炭濃度 2%～20%）を用いた強度評価を行い、ASP 配合時と同等の強度向上効果が得られる副生炭の許容濃度として 10%以下を閾値として設定した。以上の結果より、工業的に高収率で新規固形バインダーを製造可能な条件として、抽出温度 380℃、昇温速度 150℃/min とし、また新規固形バインダーに含まれる副生炭濃度を 10%以下とすることで、ASP と同等の強度向上効果が得られることを確認した。

さらに新規固形バインダー中の副生炭濃度と強度向上効果の関係を調べるため、副生炭濃度の異なる複数の新規固形バインダーを用いて石炭層に対する浸透距離を測定した。その結果、副生炭濃度が低いほど石炭層への浸透距離が増加する傾向が確認され、ASP と同等の浸透距離を示す新規固形バインダー中の副生炭濃度は 10%であった。これらの結果より、フェロコークスに対する強度付与効果は、溶融した固形バインダーの浸透に伴う粒子間の空隙充填に起因することを明らかにした。



図 3-9 新規固形バインダー連続製造設備 (BSU)

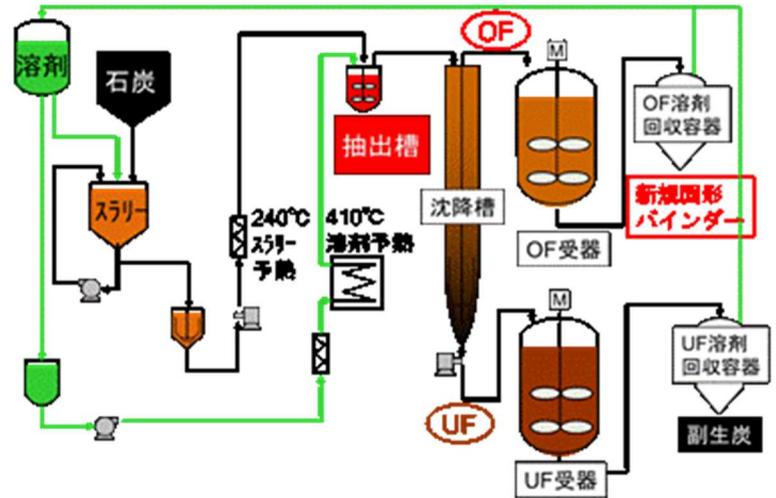


図 3-10 新規固形バインダーの製造フロー

④-2 新規液体バインダー開発

【目標】

- 2017 年度 コークス炉から発生する中低温タールの性状・組成分析を行う。またマトリクス支援飛行時間型質量分析計を 2017 年度に導入し中低温タールの分子量分布解析を行う。
- 2018 年度 従来の液体バインダー、中低温タールおよび石炭抽出物、それぞれの化学構造上の、あるいは分子量分布における差異を踏まえて、フェロコークスに適した液体バインダーを製造するための条件を探索する。
- 2019 年度 フェロコークスに適した液体バインダーを製造するための条件の探索を継続する。中低温タールを原料とした新規液体バインダーの試作を行い、バインダー性状の評価およびタブレットスケールでの冷間強度評価を行う。成型物の強度目標：割裂引張試験において、既存液体バインダー (SOP) と同等以上。
- 2020 年度 東北大学の圧縮挙動予測モデルの計算結果を新規液体バインダーの添加条件に反映して、タブレットスケールでの冷間強度評価を実施する。中規模設備から得られた中低温タール (以下、フェロコークスタールと称す) の化学構造や分子量分布を把握する。フェロコークスタールを原料とする新規液体バインダーの試作試験に着手し、タブレットスケールでの成型物の冷間強度評価を実施する。成型物の強度目標：割裂引張試験において、既存液体バインダー (SOP) と同等以上。上記結果に基づく新規液体バインダーの製造オプションを提示する。

【成果】

④-2 フェロコークスプラントからの副生物である中低温タール (フェロコークスタール) を原料とする新規液体バインダーの開発を進めるにあたり、バインダーを構成する成分の分子量分布がバインダーの溶解性や接着性に大きく影響していると考えられることから、分子量分布を迅速に高精度で評価できる MALDI-TOF/MS を導入するとともに溶剤分別および粘度測定を行い既存の液体バインダー (SOP) と中低温

タールの性状比較を行った。

結果 MALDI-TOF/MS で測定した分子量分布から中低温タールは分子量 m/z で 400 以上の重質な成分が少ないことを確認した。また溶剤分別の結果より中低温タールは、SOP に比べ、トルエン不溶-THF 可溶成分（中質成分）や THF 不溶成分（重質成分）をほとんど含まず、約 95%が軽質なトルエン可溶成分（軽質成分）で構成されていることがわかった。このような成分構成の違いにより、中低温タールの成型温度付近（120°C）における粘度は、SOP の約 1/4 と低いことを確認した。

以上の結果より、中低温タールは SOP に比べて重質成分が少なく、液体バインダーとして利用するためには改質（重質化）が必要であると示唆された。従って、中低温タールを原料に SOP 並みの成型物強度の向上効果を発揮できる新規液体バインダーを製造するための改質方法を検討し、以下の 3 種類の方法を提案した（新規液体バインダーの試作試験に使用した原料は、中低温タールを入手するまでの代替品としてコールタールを使用した）。

①低沸点成分の除去（分画温度を変えることでバインダー特性を制御）

②新規固形バインダーとの混合熱処理

（新規固形バインダーの混合比を変えて、加熱化で混合することでバインダー特性を制御）

③混合抽出（石炭抽出溶剤の一部として中低温タールを活用する新規バインダーの製造）

上記の改質方法を用いた種々の新規液体バインダーの試作試験の結果、何れの方法を用いても原料（コールタール）の改質（重質化）が可能であり、試作条件により新規液体バインダーの軟化点や粘度を調整可能であることを確認した。各試作バインダーを用いた成型物強度の評価を行った結果、改質方法①のコールタールの低沸点成分 27%カット品および改質方法②のコールタールと新規固形バインダーの重量比 2:8 品において、SOP 使用時と同等以上の成型物強度が得られることがわかった。SOP と同等の成型物強度の向上効果を有する各バインダーの特性について調べたところ、何れのバインダーも改質（重質化）により成型温度付近（140-150°C）における粘度が SOP と同等の値に変化していることが確認された。これらの結果より、成型温度付近の液体バインダーの粘度が成型物の強度支配因子の一つであることが明らかになった。

現在 JFE スチール(株)福山事業所の中規模設備によるフェロコークスの製造試験がスタートしており、9 月以降に中規模炉設備の副産品である中低温タールを入手できる予定である。入手後は化学構造や分子量分布等の測定に加え、成型温度付近の粘度の変化を指標とした改質条件の調整により、中低温タールを原料とした SOP 並みの強度向上効果を有する新規液体バインダーの試作を行う。

④-3 新規固形および新規液体バインダーの冷間強度発現機構の解明←

【目標】

2017 年度 成型物の構成物質である、石炭、鉄鉱石、バインダーそれぞれについて、弾性率や密度等、解析に必要な基礎物性を明らかにするとともに、タブレット成型体内部の気孔・連結構造を、X 線 CT 法等により検討する。

2018 年度 剛体ばねモデルを用いた破壊解析、実験との比較により、フェロコークス製造に使用するバインダーの接着特性を把握し、フェロコークスの冷間強度発現機構を解明する。フェロコークス冷間成型物（タブレット成型体）について、各構成要素の基礎物性に基づいた剛体ばねモデルによる破壊解析と、強度試験実測値との比較をおこない、強度の支配要因やバインダーの役割を解明する。

2019 年度 石炭-バインダーが共存する充填物の圧縮試験を行い、実験値とモデル解析値を比較することでバインダー添加によるすべりや高さ方向の充填密度への影響を定量化する。上記影響を反映した圧縮成型時の石炭-バインダーにおける圧縮挙動予測モデルを構築する。モデル解析結果の誤差：10%以内。

2020 年度 成型物の破壊現象の再現に必要な引張挙動予測モデル構築のため、石炭-バインダー-鉄鉱石が共存する成型物の冷間強度試験を実施する。圧縮成型時の石炭-バインダー-鉄鉱石の圧縮挙動予測モデルを構築し、フェロコクスに適したバインダーの添加条件を提案する。モデル解析結果の誤差：10%以内。

【成果】

フェロコクス成型体構造の破壊挙動を再現可能な剛体ばねモデル（RBSM）を構築するための検討として、石炭の圧縮成型挙動に対する石炭種および粒径の影響評価、また石炭成型物の割裂引張試験における破壊挙動評価を行った。石炭の圧縮成型挙動は炭種および粒径の影響を受け、ハードグローブ粉碎性指数（HGI）が小さい炭種ほど圧縮時の最大応力が大きいこと、また石炭粒径が大きいほど圧縮応力が小さくなることがわかった。後者の理由として石炭粒径が大きいほど石炭充填層内で増加する石炭粒子間の空隙が応力の発生を抑制するためと考えられた。

以上より、石炭種や粒径が石炭の圧縮成型挙動に影響することに加え、成型体の空隙率分布も考慮して強度予測モデルを構築しなければいけないことが明らかになった。次に石炭成型物（直径 9mm、高さ 13mm の円柱、気孔率 10%～20%）の破壊挙動を評価するため割裂引張試験を行い、石炭成型体は 20～30kPa の引張応力で中心付近に亀裂が入り破壊されることが観察された。試験で観察した石炭成型物の破壊挙動を剛体ばねモデル（RBSM）で再現するため、図 3-11 に示す直径 9mm、高さ 13mm の円柱（割裂引張試験と同じ）を解析対象とし、気孔率を 0～30%まで変化させ、円柱上部から割裂引張試験と同様に荷重を加えた際の破壊挙動を解析した。図 3-12 に示す応力-変位線図より、解析対象の気孔率の増加に伴い、応力-変位線の傾きが小さくなり、破断強度も低下した。図 3-13 に解析対象内部の引張破壊およびせん断破壊の様子を示す。引張破壊とせん断破壊の何れも気孔率が 0%の場合は、左右対称に破壊が生じ、また気孔率が 10%以上の場合は、破壊は左右で異なる箇所が生じた。その理由として、気孔率 0%では応力が解析対象に均一に働き、気孔が存在する場合は、解析対象内部での応力集中箇所が不均一となるためと示唆された。本解析結果において、実際の石炭成型物と同じ気孔率 10%～20%では、引張応力は 20～40kPa と計算され、また破壊挙動も類似していることから、圧縮により生じる破壊を概ね再現できるモデルを構築した。

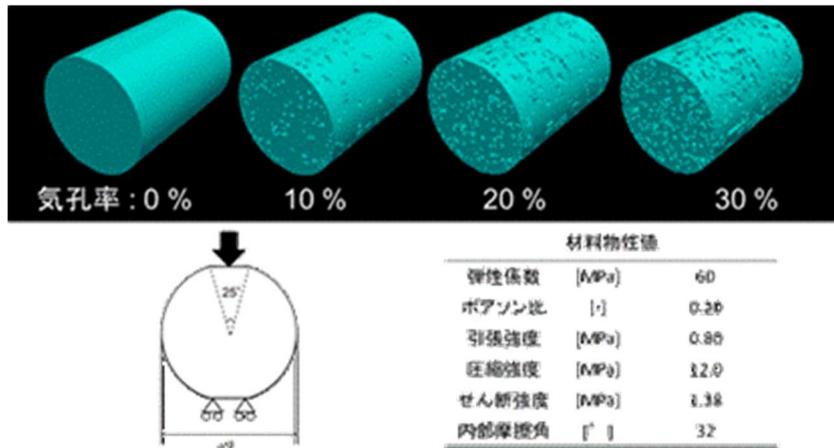


図 3-1-1 石炭成型物モデル

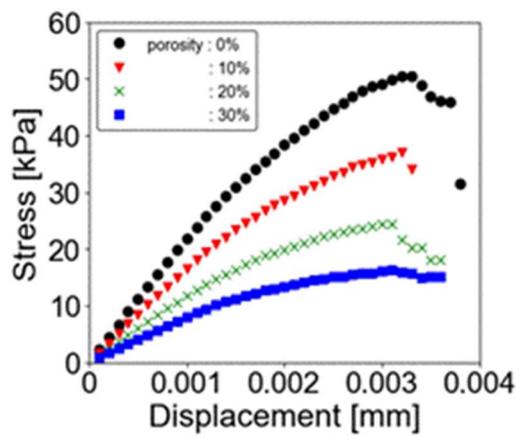


図 3-1-2 破壊解析における応力

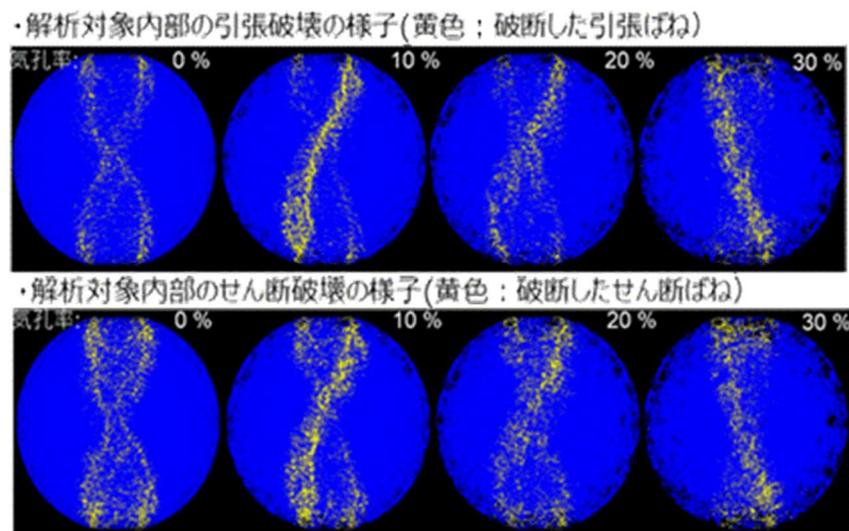


図 3-1-3 解析対象内部の引張破壊(上)およびせん断

次に石炭粒子充填層の成型過程および成型物の構造に影響を及ぼす因子を明らかにするため、石炭粒子

充填層に対する圧縮負荷/除荷試験および離散要素法（DEM）による数値解析を行い、圧縮に伴う充填構造および応力の変化から、粒子に働く摩擦力が成型過程や成型物の構造に及ぼす影響を数値解析的に検討した。本検討では、接触にともなう粒子の塑性変形を模擬するために、Walton and Braunによって提案されたモデル[1]を適用し接触力を算出した。数値解析の結果は変位の増加に伴い応力が増加する様子や変位の減少に伴う応力の急激な減少が表現できており実験結果を良好に再現した（図 3-14）。また充填物の粒子間、粒子-壁間の摩擦抵抗が低いほど充填物高さ方向の充填率分布が均一化することを明らかにした。これらの結果を実験結果と比較して考察すると、実験によって得られた充填率の分布は粒子と壁の摩擦抵抗によって充填層全体に力が十分に伝わらなかったことによって生じたものであることが明らかになった（図 3-15）。

以上の結果より、塑性変形を表現可能なモデル(Walton and Braun)を適用することにより、石炭充填層の圧縮挙動を良好に再現できるモデルを提案した。

石炭とバインダーが共存する充填物の圧縮挙動予測モデルの構築では、圧縮成型時の粒子同士の滑りや塑性変形などによる充填構造の変化について実験的解析と離散要素法を用いた数値解析を行った。石炭-バインダーが共存する充填物の圧縮試験の結果より、バインダー配合時に圧縮応力が低下（粒子間摩擦抵抗が低下）すること、充填性の改善により成型物強度が増加することを確認した。解析では実験で確認された固体バインダーの配合に伴う応力の減少傾向や内部の充填率を概ね表現し、石炭-バインダーが共存する充填物の圧縮挙動予測モデルを構築した（圧縮応力の実験値とモデル解析値の誤差 10%以内）。現在、鉄鉱石や液体バインダーを含む成型物の圧縮応力データの取得を神戸製鋼所と共同で進めており、石炭-バインダー-鉄鉱石が共存する充填物の圧縮挙動予測モデル構築の目標を達成する。

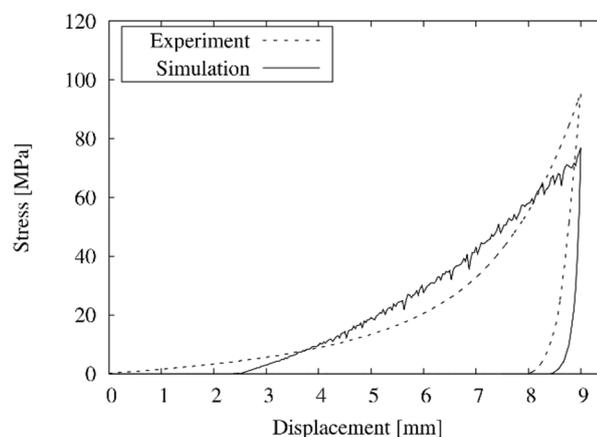


図 3-14 石炭充填層の負荷/除荷試験による圧縮挙動の比較

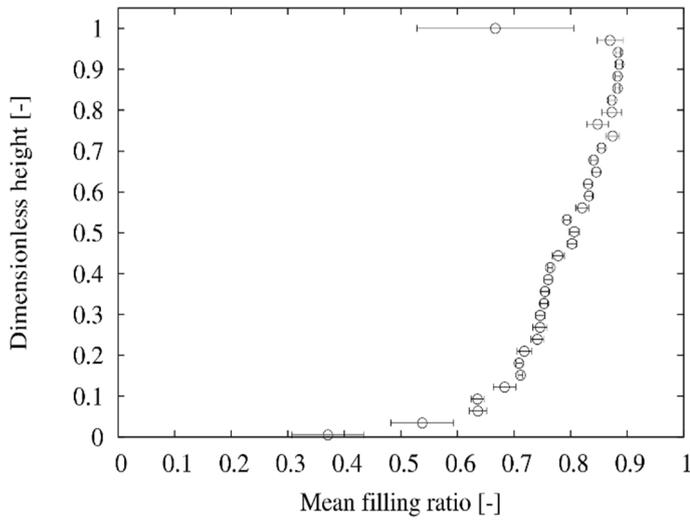


図3-15 充填層高さ方向における充填率分

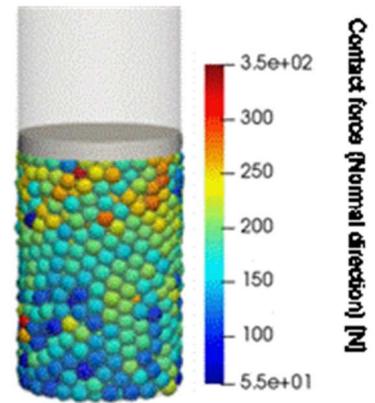


図3-16 充填構造内の粒子に生じる接触力

課題⑤ フェロコークス導入効果の検証

【中間目標】

⑤-1 で得られた高温性状調査結果と⑤-2 で得られたフェロコークス反応モデルを反映した、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させ、ケーススタディによる物質収支誤差が許容範囲（1%程度）であることを確認する。

【成果】

一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの高温性状を調査し、温度とガス化率の関係を評価した。また、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの試作品を完成させ、ケーススタディを実施した。

また、一般炭、低品位原料で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、測定した反応速度をアレニウス型反応速度式として定式化し、フェロコークス製造条件が頻度因子、活性化エネルギーに及ぼす影響を評価した。

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び、見通しについて

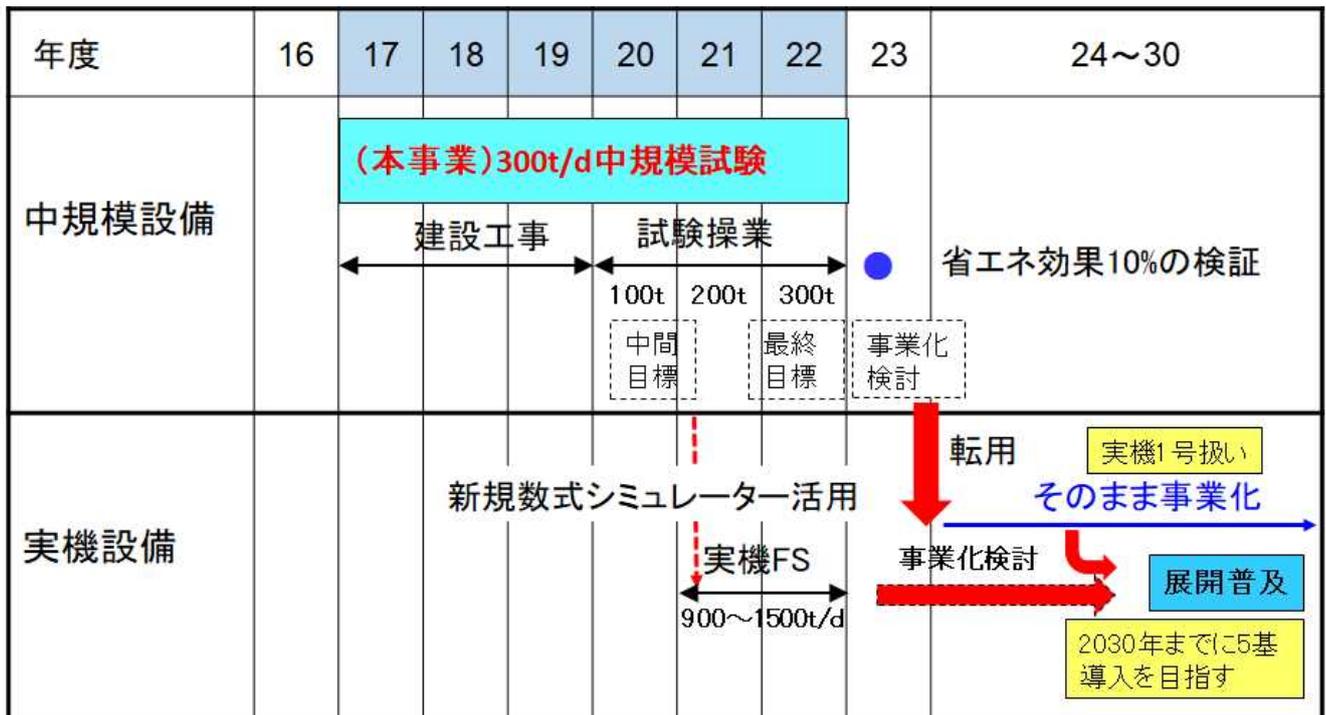
1. 成果の実用化・事業化に向けた戦略

1-1 実用化

- ・ 中規模設備で300t/dの製造技術（混練、成型、乾留、粘結材の各技術）を確立するとともに、設備の耐久性を検証する。
- ・ 高炉での長期使用（原単位30kg/t）なことを実証する。
- ・ フェロコークスでコークスを1/3置換した場合の製鉄工程における省エネ効果10%を検証する（新規数式シミュレータによる推定含む）。

1-2 事業化

- ・ 中規模設備（300t/d）で実用性（省エネ・CO2削減効果・製造コスト低減）が認められれば、研究開発補助金制度に則り、製鉄プロセスにおいてそのまま工程化する（2023年以降）。
- ・ 上記設備で構成された商用規模設備（900～1500t/d規模）のFS（設備・操業コスト、及び使用エネルギーの評価）を実施し、実用性が認められれば、2030年までに5基導入を目指す（ただし、フェロコークス導入によって、製鉄工程から発生するエネルギー、すなわち、下工程に加熱炉燃料として、あるいは発電所向けに供給されるエネルギーが減少するため、その補填を目的に付帯インフラ（LNG供給等）の整備が前提である）。



●: 基本技術確立

図4-1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

2. 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

【実用化・事業化活動の実施者】

- ・ 本開発の成果は国内高炉メーカーにより実用化・事業化される。

- ・知財権確立と導入国からの対価を前提とし、国外へ技術提供も模索していく。

【実用化・事業化の計画及びマイルストーン】

- ・2022年頃までに実用化研究を完了し、2024年以降に中規模設備（300t/d）を商業1号機として事業化する。そして、2030年ごろまでに国内で最大5基の実機導入を目指す。

3. 成果の実用化・事業化の見通し

【実用化・事業化に向けての課題とその解決方針】

- ・実用化・事業化の課題は技術確度の向上（省エネ効果の確度）と経済性確保（操業コストの低減）、および付帯インフラ（LNG供給等）の整備である。
これらの条件を念頭に、2030年以降までの事業化計画については、事業終了までに、本プロジェクト参加各社による社内検討を実施する。

【研究成果のニーズと経済性の確保】

- ・本PJは、水素還元などのゼロカーボン技術のように開発期間が長期にわたるものとは異なり、比較的短期に実機化が期待できる技術である。
- ・2030年までの本技術の実機化を促進するためには、経済効果の最大化（高炉の還元材比低減、省エネ、CO2削減量の拡大、安価原料の使用拡大など）が重要である。今後の鉱石・石炭の価格や、下工程への補填エネルギー種（天然ガス、水素、電力など）・価格、およびこれらのインフラ状況、炭素税などの動向などを考慮して、経済効果を見極めていく必要がある。

【波及効果】

- ・一般に世の中に流通している有機系固体バインダーとして石油由来のバインダーであるASP（アスファルトピッチ）が知られているが、本事業で開発した新規固形バインダーは石炭由来であることが特徴である。この石炭由来であるがゆえに相手材の種類によっては、「相性」の点で石油系バインダーより優れた特性を発揮する場合も想定され、新たな用途開発に繋がる可能性がある。
- ・本事業で開発した「混合・攪拌シミュレーションモデル」は、粒径や比重の異なる多種原料（固体3種類、液体1種類）の混合状態を高度にシミュレートし得る新たな数値計算手法である。このような複雑な粉体系を扱う業種（例えば食品、医薬品分野など）への本数値計算手法の適用・展開が図れば、他業種の技術開発力向上にも大いに寄与することができる。

「環境調和型プロセス技術の開発」基本計画

環境部、省エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

本事業の目的は高炉法による一貫製鉄所のCO₂発生量を抜本的に削減し、地球温暖化防止に貢献するため、高炉からのCO₂の発生量を減少させる技術、及び発生したCO₂を分離・回収する技術を開発することである。

鉄鋼業は我が国産業部門の中でCO₂発生量の約39%、国全体の約14%を占める（2013年度）最大のCO₂排出業種であり、その中でも特に排出量の多い高炉法による製鉄プロセスにおいては地球温暖化対策として抜本的なCO₂排出量の削減が求められている。

しかしながら、我が国の鉄鋼業についてみると、製鉄技術は既に世界最先端の水準にあり、廃熱や副生ガスの利用による省エネルギーも極限に達しているため、ポスト京都議定書に向け世界規模でのCO₂削減を実現するためには、革新的な製鉄プロセス技術開発が必要とされている。2007年5月に発表された地球温暖化に関する総理のイニシアティブ「美しい星50（Cool Earth 50）」においても、示された三原則の一つとして「省エネなどの技術をいかし、環境保全と経済発展とを両立すること。」が提言されており、「革新的技術開発」の一例として本技術開発が位置付けられているところである。

上記のイニシアティブを踏まえて2008年3月、全世界の温室効果ガス排出量を現状に比べて2050年までに半減するという長期目標実現に向け、経済産業省において「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」が策定されている。その中において革新的製鉄プロセスは効率の向上と低炭素化の両面から、CO₂大幅削減を可能とする「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術21」の一つとして位置付けられている。

また、その後策定された環境安心イノベーションプログラム基本計画（2010年4月）、及びエネルギー基本計画（2014年4月）に基づくエネルギー関係技術開発ロードマップ（2014年12月）においても、革新的技術のひとつとして「環境調和型製鉄プロセス」が選定された。

本技術開発においては、これまで水素還元活用プロセスとして、コークス製造時に発生する高温のコークス炉ガス（COG）に含まれる水素を増幅し、コークスの一部代替に当該水素を用いて鉄鉱石を還元する技術、及び高炉ガス（BFG）からCO₂を分離するため、製鉄所内の未利用排熱を活用した革新的なCO₂分離回収技術の開発に取り組んできた。これらの技術開発においてフェーズI-STEP1（2008～2012年度（5年間））として要素技術開発を実施した。フェーズI-STEP2（2013～2017年度（5年間））において要素技術を組合せたパイロットレベルの総合実証試験を行った後、フェーズII-STEP1（2018～2022年度（5年間））、フェーズII-STEP2（2023～2025年度（3年間））での実用化開発を経て、最終的に製鉄所における現状の全排出レベルに比較して約30%のCO₂削減を可能にする技術の確立に資する。

一方、フェロコークス技術の開発は、資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発（2009～2012年度（4年間））において要素技術開発を実施し、既に実証段階に到達

しているプロセスである。本プロセスでは、一般炭と低品位鉄鉱石の混合成型・乾留により生成された金属鉄の触媒作用を利用して還元を低温で行い、還元効率を飛躍的に高めた革新的塊成物（フェロコークス）を使用することで投入するコークス量を削減できる省エネ技術開発である。本プロセス技術で得た知見や成果を、水素還元活用プロセスの中に取り込むことで省エネ、CO₂削減効果を最適化できるメリットを享受できることから、2017年度より、フェロコークス技術の開発を加えて一体化することにした。本プロセスでは、今後、フェロコークス製造量300 t/dの規模の中規模設備を建設し、フェロコークス製造技術を確立するとともに、中規模設備で製造したフェロコークスを溶銑製造量10,000 t/dの実高炉に連続的に長期装入したときの高炉の還元材比や操業安定性（特に通気性）に及ぼす影響を確認し、最終的に製銑プロセスのエネルギー消費量を10%削減する技術の確立に資する。

(2) 研究開発の目標

研究開発項目 1. 水素還元等プロセス技術の開発(フェーズⅡ-STEP1)

①アウトプット目標

【フェーズⅠ-STEP1中間目標(2010年度)】

最終目標を達成するための主要構成技術の目途を得る。

【フェーズⅠ-STEP1最終目標(2012年度)】

① 高炉からのCO₂排出削減技術開発

- ・水素などによる鉄鉱石還元メカニズムと反応制御の基礎技術を確立する。
- ・水素の増幅率を2倍とするコークス炉ガス(COG)改質技術を確立する。
- ・水素還元高炉用のコークス強度(ドラム強度)DI \geq 88を満足する高強度コークス製造技術を確立する。

② 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収技術開発

- ・高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂(「分離回収法開発ロードマップ(CCS2020)」に示された目標)を可能とする技術の見通しを得る。

【フェーズⅠ-STEP2中間目標(2015年度)】

(a) 高炉からのCO₂排出削減技術開発

- ・水素還元の効果を最大限とするための技術をラボレベルで検討し実現性、有効性に対するめどを得て具体的な実証試験の計画を立案する。
- ・10m³規模試験高炉の建設を完了させる。
- ・触媒を用いてCOGに含まれるタールや炭化水素を水素に改質する技術において高炉への吹き込みガス用としての改質反応の最適化、改質触媒の活性劣化対策技術の確立を図る。
- ・メタン改質等の総合的に改質向上に資する要素技術のめどを得る。

(b) 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収技術開発

- ・CO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂を実現可能な技術の充実を指向し再生温度、分離回収エネルギーの低減などの技術開発のめどを得る。

【フェーズⅠ－STEP2最終目標(2017年度)】

(a) 高炉からのCO₂排出削減技術開発

- ・ 10m³規模試験高炉により高炉からのCO₂排出量を削減する技術を確立する

(b) 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収技術開発

- ・ 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂(「分離回収法開発ロードマップ(CCS2020)」に示された目標)を可能とする技術を確立する。

【フェーズⅡ－STEP1中間目標(2020年度)】

(c) 高炉からのCO₂排出削減技術開発

- ・ 高炉からのCO₂排出削減量約10%達成の見通しを得る。

(d) 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収技術開発

- ・ 分離回収エネルギー改善としての、吸収形態改善と分極影響の緩和の両技術の改善に新規技術を見出すことで、分離回収エネルギー1.6GJ/t-CO₂達成への要素技術を構築する。

【フェーズⅡ－STEP1最終目標(2022年度)】

(c) 高炉からのCO₂排出削減技術開発

- ・ 高炉からのCO₂排出約10%削減の実現性を技術的に最大化する技術の見通しを得る。

高炉の実機部分確性用の「全周羽口吹込み」の試験は、CO₂削減技術開発の状況を見ながら、フェーズⅡ－STEP2開始(2023年度)以降に行い、上記目標達成に資する。

(d) 高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収技術開発

- ・ CO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂を実現可能な技術の充実に指向し、分離回収エネルギー1.6GJ/t-CO₂を到達し、CO₂排出削減量約20%の技術に資する。

②アウトカム目標

2030年に実用化開始を目指し、製鉄所における現状の全排出レベルに比較して総合的に約30%(185万tCO₂/年、2030年に初号機1基で適用時を想定)のCO₂削減可能な技術を確立することで、地球温暖化防止に貢献する。また、コークス投入量の削減により29億円規模/年の経済効果が見込まれる。(炭素税等、条件が変化した場合の規模)

これらの運転実績を踏まえて、2050年までに国内で稼働中の高炉27基に適用した場合で、CO₂削減4,990万t-CO₂/年、コークス投入量の削減により800億円規模/年の経済効果を見込む。また、高炉を水素還元活用型に更新するための改造市場として2兆7,000億円規模を見込む。さらに、鉄鋼の海外生産及び海外製品の輸入を抑制し、国内高炉を操業することにより、鉄鋼業(製造業)の国内総生産市場18兆円維持に貢献する。(炭素税等、条件が変化した場合の規模)

③アウトカム目標に向けた取組

本事業で開発した新型高炉（水素還元活用＋CO₂分離回収）の国内導入と並行して、海外への展開についても検討する。

また、本事業で開発した技術優位性の高い要素技術（高炉内3次元シミュレーション技術、高効率熱交換技術、CO₂分離回収技術等）を他の産業界へ水平展開し、社会貢献を進める。そのため、要素技術の対外発表を積極的に進めると共に、関連分野技術のベンチマーキングを行ったうえで、協業を含めたオープンイノベーションに取り組む。

研究開発項目2. フェロコークス技術の開発

①アウトプット目標

【中間目標（2020年度）】

(a) フェロコークス製造中規模設備（以下「中規模設備」という。）での製造技術実証

- a-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立
- a-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

- ・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプを完成させ、混合均一性の計算ができることを確認する。
- ・300 t/dの実証設備を建設し、連続一貫製造の負荷運転を実施する。
- ・フェロコークスが設計どおりできることを確認する。

指標1：原料の均一混合技術の確立（個体3種類、液体1種類の混合）混合度95以上（ラボ実験）

指標2：乾留後塊成物のドラム強度： $DI150/15 \geq 80$ （ラボ実験）

(b) 一般炭、低品位原料使用時の製造技術

- ・使用可能な一般炭2銘柄及び低品位鉄鉱石2銘柄の選定を完了させる。
- ・一般炭と低品位鉄鉱石、及び(d)で製造した固形新規バインダーを用い、ラボスケールの成型試験を行い、各配合比率等の成型条件を確立する。

指標：成型物の強度（I型ドラム強度）： $ID30/15 \geq 85$ （ラボ実験）

(c) 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

- ・ラボ検討に基づきフェロコークスを実炉に装入するための適切な装入方法を提示する。
- ・フェロコークスの高炉への装入設備の設置を完了させる。

指標：フェロコークスの実高炉への装入量3 kg/t程度で、安定して装入できることを確認する。

(d) 新バインダー強度発現実証

- ・中規模設備に供し得る新規固形バインダーを試作する。
- ・液体新規バインダーの試作をおこない、タブレットスケールで所定の冷間強度を確保できることを実証する。
- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルのプロトタイプの作成を完了する。バインダー及び鉄鉱石を配合した塊成物をモデル物質として強度評価を実施し、モデル計算結果との比較を実施する。

指標：液体新規バインダーの製造オプションの提示。

(e) フェロコークス導入効果の検証

- ・中規模設備で製造したフェロコークスの高温性状の調査を実施する。
- ・(d) で開発した新規固形バインダーと新規液体バインダーを用いてラボスケールで作成したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルに組み入れる。

【最終目標(2022年度)】

(a) 中規模設備での製造技術実証

a-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立

a-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

- ・生産量300t/dで長期間安定稼動が可能なことを実証する。
- ・高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。
- ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用い、均一性を確保できる運転条件を提示する。

指標1：原料の均一混合技術の確立（固体3種類、液体1種類の混合）：混合度95以上

指標2：乾留後塊成物のドラム強度： $DI150/15 \geq 80$ (*)

(*)「資源対応力のための革新的製鉄プロセス技術開発」において、フェロコークス製造量27.5t/d～30t/dとし、乾留炉操業30日間で740tのフェロコークスを製造した際、目標強度 $ID30/15 > 81$ 以上の歩留りが93.5%であった。

(b) 一般炭、低品位原料使用時の製造技術

- ・ラボスケールでの試験結果から、原料（鉄鉱石、石炭）の絞込みを行う。これら原料がフェロコークス用原料として適していることを検証する。

指標：成型物の強度（I型ドラム強度）： $ID30/15 \geq 85$

(c) 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

- ・高炉への長期装入試験を行い、高炉の還元材比や高炉操業の安定性に及ぼす影響を評価する。また、製鉄工程における省エネ効果に及ぼす影響を把握し、(e)の数値シミュレーションと合わせ、目標の省エネ10%を達成する。

指標：連続操業試験：30日以上

(d) 新バインダー強度発現実証

- ・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。
- ・所定の強度を実現しうる液体新規バインダー製造プロセス案を提示する。
- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルを提示する。

指標：(a)及び(b)の達成に資するものであり、指標その他は(a)、(b)と同じ

(e) フェロコークス導入効果の検証

- ・フェロコークスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。

- ・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

指標：評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認

- ((e)の数値シミュレーションと(c)(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の省エネ10%を検証する)。

②アウトカム目標

2030年頃までに1,500トン/日規模の実機5基を導入し、溶銑製造量2,000万トン/年(400万t/年高炉5基)に対して、省エネルギー効果量として原油換算量で19.4万kl/年、CO₂削減量は82万t/年を見込む。また、フェロコークス原料炭の一般炭への利用拡大を進めることにより、約280億円の経済効果を見込む。

③アウトカム目標に向けた取組

2023年頃までに、実高炉(1基)において、製銑プロセスのエネルギー消費量の10%削減する技術の確立を目指す。

また、中規模設備(300t/d)での製造技術の実証後、当該設備を増強し、実用化する(2030年頃)。

(3) 研究開発の内容

研究開発項目1. 水素還元等プロセス技術の開発(フェーズII-STEP1)

本技術開発(フェーズII)では、CO₂発生量を大幅に削減する、環境に調和した製鉄プロセスの開発として、世界最大規模の試験高炉と3次元高炉数学モデルの活用で、送風操作の可能性を最大限追求する。CO₂分離回収技術においては、実証試験とマッチングできるCO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂以下を深化する技術を開発するため、高性能化学吸収液等の開発、未利用排熱活用技術の適応研究を実施し、更なるコスト低減技術の構築を図る。また、フェーズII-STEP2においては、それまでの知見をベースに、高炉の実機部分確性用の「全周羽口吹込み」の試験を実施する。

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」、かつ大規模な検証が必要なため、委託事業として実施する。

[委託事業]

(a) 高炉からのCO₂排出削減技術開発

フェーズII全体の工程としては、2018年度～2022年度に12m³規模試験高炉における送風操作及び装入物操作と合わせて、高炉3次元数学モデルの精度向上を行い、試験高炉規模で高炉からのCO₂排出削減量約10%を確立する。2023年度以降、その知見に基づき、実機設備の部分検証としての「羽口全周吹込み」設備の製作・施工・実機検証を行う。その内、フェーズII-STEP1では、以下を実施する。

① 鉄鉱石還元への水素活用技術の開発

- ・12m³規模試験高炉等による水素還元総合最適化技術開発

還元ガス吹き込み方法の最適化、水素還元時におけるガス利用率維持のための操業要因の解析などを実施し、水素還元の効果を最大限とする技術を確立する。

- ・水素還元に適した原料設計

12m³規模試験高炉で高被還元性鉱石の対策品(フェーズI-STEP2の最終試験結果を評価したうえでの対策品)での検証試験を行う。

② コークス炉ガス(COG)改質技術の開発

COG改質技術においては、フェーズI-STEP2で確性した「触媒改質・部分酸化プロセス」の成果をベースに、シャフト吹き込みの熱・ガス流動制御視点で実機・実装に必要なプロセスを検討する。目標は、水素増幅率2倍を担保できるプロセスを確立することとする。

③ コークス改良技術開発

粘結材(HPC)製造のスケールアップに資するベンチスケール連続装置の改造からスタートする。連続製造設備の配管の温度管理精度向上による、輸送流体の閉塞防止技術確立を目的とし、熔融状態HPCの熱分解および温度変化に伴う流動性の変化を粘度として精度良く定量的に推算する技術を確立した上で、安定的に流体輸送できる最大粘度50,000mPa・sを起点に熔融HPCハンドリングの最適な温度管理指標を確立する。

(b) 高炉ガスからのCO₂分離回収技術開発

高炉ガス(BFG)からのCO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂を深化する技術確立、及び排熱とのマッチングのエンジニアリング検討を主体に取り組む。その内、フェーズII-STEP1では、以下を実施する。

① CO₂分離回収技術開発

製鉄所特有の仕様に適した独自性を明確にした上で、CO₂分離回収技術として、化学吸収法の熱消費原単位の極限低減を図る。

・化学吸収法によるCO₂分離エネルギーコストの削減技術開発

吸収形態改善と分極影響の緩和の両技術の改善に新規技術を見出し、その相乗効果発揮を狙い、量子化学計算および連続分離回収実験による対策の集積評価で、1.6GJ/t-CO₂への到達に取り組む。

② 未利用排熱活用技術の開発

CO₂分離回収に必要なエネルギーを製鉄所内の未利用排熱のエネルギー(熱又は電力に変換)で賄うため、未利用排熱の活用技術を開発する。高効率熱交換機のダスト等付着対策として、ラボ評価を併用しつつ、閉塞対策のスケールアップにつなげる。目標値は温度効率66%、耐久性700時間とする。

また、本技術の水平展開を図り、他分野への早期実用化に取り組む。

(c) 全体プロセスの評価・検討

試験高炉における操業結果を受けての高炉からのCO₂排出削減、及び高効率熱交換機の最新特性を受けてのCO₂分離回収の双方と、所全体プロセス評価検討WGのエネルギーバランスを評価し、商用高炉のものと比較する。これにより、排出量30%に資する可能性の組み合わせ検討を実施する。

また、本事業の市場への展開を図るために、ターゲットの明確化と技術優位性の獲得を進める。ターゲットを明確にするため、経済性調査と技術本事業適用時の高炉改造に

係る市場規模、コークス投入量低減によるコスト削減など経済的効果を検討する。技術優位性を獲得するために、強固な特許網構築を目指し、特許マップを作成・共有し、基本特許を中心とし、抜け漏れのない周辺特許出願を効果的に進める。

研究開発項目2. フェロコークス技術の開発

本研究開発は、助成事業として実施する。

助成事業（NEDO負担1/2）

本研究開発は、フェロコークスを製造・使用することによって、製鉄技術に革新をもたらすもので、300t/d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するものである。

具体的には、フェロコークス製造量300t/dの規模の中規模設備を建設し、フェロコークス製造技術を確立するとともに、中規模設備で製造したフェロコークスを溶銑製造量10,000t/dの実高炉に連続的に長期装入したときの高炉の還元材比や操業安定性（特に通気性）に及ぼす影響を確認する。また、製鉄工程全体の物質・エネルギーバランスから、省エネ効果を評価する。さらに、操業安定性を鑑みながら、フェロコークス比の影響を調査するとともに、結果の外挿及び数値シミュレーションから、フェロコークス比が33%のときの製鉄工程の目標省エネ効果（10%）を達成する。

フェロコークス技術の開発におけるスケールアップの考え方としては、10倍を基本としている。最終的な実機は1,500トン/日の製造能力であり、これは300トン/日のユニットを5つ並べた規模である。そのため、実機での技術課題は300トン/日機で検討できることから、今回の実証は300トン/日機を進める。本プロジェクトの前段である、「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発（2009年度～2012年度）」においては、300t/dの1/10である30t/dのパイロットスケールで評価、「革新的製鉄プロセスの先導的研究」（2006年度～2008年度）（委託）はラボ試験のため、1/100である300kg/日のベンチスケールで評価を行なっている。

(a) 中規模設備での製造技術実証

「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」におけるパイロット規模試験（30t/d）と実機（1500t/d）の中間ステップとして、中規模設備でのフェロコークス連続製造技術を確立するため、長期操業試験を行うべく、以下の研究を行う。

a-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立

a-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

- ・生産量300t/dで長期間安定稼働が可能なことを実証する。
- ・高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。
- ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用い、均一性を確保できる運転条件を提示する。

指標1：原料の均一混合技術の確立（固体3種類、液体1種類の混合）：混合度95以上

指標2：乾留後塊成物のドラム強度：DI150/15 \geq 81（*）

(*)「資源対応力のための革新的製鉄プロセス技術開発」において、フェロコークス製造量 $27.5 \text{ t/d} \sim 30 \text{ t/d}$ とし、乾留炉操業30日間で740tのフェロコークスを製造した際、目標強度 $DI150/15 > 81$ 以上の歩留りが93.5%であった。

(b) 一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証

「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年度～2012年度)におけるパイロット規模試験(30t/d)で用いた石炭をベースに、更なる銘柄拡大(資源制約の緩和)、低廉化を目的に研究を行う。

- ・ラボスケールでの試験結果から、原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みを行う。これら原料がフェロコークス用原料として適していることを検証する。

指標：成型物の強度(I型ドラム強度)： $ID30/15 \geq 85$

(c) 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」においては還元材比とともに重要な操業管理指標である通気性の変化についての解析が課題として残されていた。本研究では、高炉での長期操業試験を通して、フェロコークスの高炉操業に与える効果(還元材比、通気性)の検証を行う。

- ・高炉への長期装入試験を行い、高炉の還元材比や高炉操業の安定性に及ぼす影響を評価する。また、製鉄工程における省エネ効果に及ぼす影響を把握し、(e)の数値シミュレーションと合わせ、目標の省エネ10%を達成する。

指標：連続操業試験：30日以上

(d) 新バインダー強度発現実証

過去の研究開発においてすでに既存固体バインダーと同等以上の性能を有する新規バインダーが見出されその性能はパイロット規模試験(30t/d)で確認されているが、さらに、フェロコークス製造においてシャフト炉による乾留工程で副生するタールを回収し、成型用バインダーとして循環使用するシステムの構築が課題として挙げられている。そこで本研究では、フェロコークス製造用バインダーの製造技術に関して以下の研究を行う。

- ・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。
- ・所定の強度を実現しうる液体新規バインダー製造プロセス案を提示する。
- ・フェロコークスブリケットの冷間強度予測モデルを提示する。

指標：(a)及び(b)の達成に資するものであり、指標その他は(a)、(b)と同じ

(e) フェロコークス導入効果の検証

乾留炉の大型化、一般炭、低品位原料の使用、新規バインダーの使用が課題であり、開発した技術の適用可能性を検証する必要がある。そこで今回は、フェロコークスの高温性状評価手法と高炉内反応シミュレーション技術の汎用性拡大技術を開発し、フェロコークスの使用が高炉操業に与える影響を以下の研究で評価する。

- ・フェロコークスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。
- ・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

指標：評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認

((e)の数値シミュレーションと(c)(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の省エネ10%を検証する)。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

水素還元等プロセス技術の開発(フェーズⅡ-STEP1)についてはNEDO環境部 春山 博司を、フェロコークス技術の開発は、NEDO省エネルギー部 田村 順一をそれぞれプロジェクトマネージャーとし、プロジェクトの企画、進行管理等を実施する。

本研究開発は、NEDOが単独ないし複数の、原則本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。)から、公募によって研究開発実施者を選定し、水素還元等プロセス技術の開発については委託により、フェロコークス技術の開発は助成(助成率1/2以内)により実施する。

共同で参加する各グループの有する技術ポテンシャルを最大限に活用して効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが委託先決定後に指名する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

なお、フェロコークス技術の開発については、研究責任者(プロジェクトリーダー)を置かない。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、NEDOに設置する委員会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させるほか、四半期に一回程度プロジェクトの進捗について委託先あるいは助成先からの報告を受けること等を行う。

委託事業については、欧州等の革新的製鉄プロジェクトの動向や国際展開を見据えた知財管理を行う。海外における知財の確保を積極的に推進するために、本事業成果の導入時期(2030年に初号機導入、2050年に国内全基への導入)を視野に入れた知的財産戦略(ノウハウ化/出願の要否、内容、分野、時期)の構築を進める。

また、水素還元等プロセス技術の開発(フェーズⅡ)及びフェロコークス技術の開発の両事業間の連携を図るために、上記委員会等への相互参加、及び技術交流会を開催し、中間評価までに技術内容を議論・共有する。

3. 研究開発の実施期間

研究開発の実施期間は、2013年度から2022年度までの10年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目的達成度、成果の技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、外部有識者によるプロジェクト評価を実施する。水素

還元活用製鉄プロセス技術開発(フェーズⅠ-STEP 2)については、外部有識者による研究開発の中間評価を2015年度、事後評価を2017年度に前倒しで実施。水素還元等プロセス技術の開発(フェーズⅡ-STEP 1)については研究開発の中間評価を2020年度、事後評価を2022年度に前倒し実施を予定しており、フェロコークス技術の開発については中間評価を2020年度、事後評価を2023年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係わる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

得られた研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとし、製鉄プロセス以外への早期実用化が見込まれる技術については、技術の横展開を後押しする。

② 標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報(TR)制度への提案等を積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④ 知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用するプロジェクトである。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、産業技術政策動向、第三者の視点から評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標や研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条一号ハに基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2013年3月、制定

(2) 2016年2月、改訂

STEP 2の内容に修正

(3) 2017年2月、改訂

フェロコークス活用製鉄プロセス技術開発を追加

(4)2018年1月、改訂

水素還元活用製鉄プロセス技術（フェーズⅡ－STEP1）の内容に修正

フェロコークス活用製鉄プロセス技術開発の実施期間を5年から6年に延長

(5)2018年10月、改訂

基本計画名称、研究開発項目名称及びプロジェクトマネージャーを修正。

研究開発スケジュールの誤記修正。

(6)2019年1月、改訂

研究開発項目2.の名称の変更。

(7)2020年2月、改訂

研究開発の内容、別添 研究開発計画を修正。

別添 研究開発計画

研究開発項目 1. 水素還元等プロセス技術の開発 (フェーズII-STEP1)

	開発テーマ	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
高炉からのCO2排出削減	6.試験高炉によるプロセス技術開発	操作及び解体調査				
	1.鉄鉱石水素還元技術開発 (数学シミュレーション)	対象炉検討・設備条件調査		事前設計		操業設計・操業解析
	3.高性能粘結材製造技術の開発	粘性計測	試験装置改造	検証試験	性能評価	
	2.コークス炉ガス(COG)改質技術の開発					吹込みハード検討
高炉ガスのCO2分離・回収	4.CO2分離・回収技術開発	新吸収液開発				
	5.未利用排熱回収技術開発	付着特性ラボ調査		付着対策設計	ラボ総合検証	スケールアップ検討
7.全体プロセス評価・検討		全体プロセス評価検討(開発結果反映)				
		2030年対応方針の再整理				次ステップ検討

(参考：フェーズII-STEP2)

	開発テーマ	2023年度	2024年度	2025年度
高炉からのCO2排出削減	1.鉄鉱石水素還元技術開発	全周羽口吹込設計	製作	試験 試験結果解析
	3.高性能粘結材製造技術の開発	製造特性評価	阻害要因対策	総合評価
	2.コークス炉ガス(COG)改質技術の開発	触媒改質実機部分適用		
高炉ガスのCO2分離・回収	4.CO2分離・回収技術開発	排熱とのマッチング検証		総合化
	5.未利用排熱回収技術開発	付着対策ロングランテスト		総合化
	6.総合開発	プロセス間ユーティリティ検討		
7.全体プロセス評価・検討		総合開発の評価		

研究開発項目 2. フェロコークス技術の開発

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
中規模設備 フェロコークス製造技術 実証	設計・建設			製造・実証		
一般炭、低品位原料使用時の製造技術	↑					
実高炉フェロコークス長期使用検証	装入検討			使用、効果検証		
新バインダー強度実証	製造実証				評価	
フェロコークス導入効果の検証	実験室レベルサンプル評価			中規模実証設備サンプル評価		
中間評価				★		

特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PTC	出願日	状態	名称
1	JFEスチール 永山幹也	特開 2019- 123779	国内	2018/1/15	公開	フェロコークス用成型物の製造方法およびフェロコークスの製造方法

a. 論文、報告書

番号	発表者	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
	橋本 佳也 庵屋敷 孝思 藤本 英和	データ同化法によるフェロコークス乾留炉ヒートパターン制御	JFE 技報 No.45	あり	2020年2月
	安室 元晴	CO2削減の取組み Initiatives to Reduce CO2 Emissions	神戸製鋼グループ 統合報告書 2019 Kobe Steel Group Integrated Report 2019	なし	和文 2019年8月 英文 2019年10月
	佐藤 道貴	製鉄プロセスの新たな 取り組み（国プロを中心として）	西山記念技術講座 （第 239・240 回）、（一社）日本 鉄鋼協会	なし	2019年10月
	佐藤 道貴	製鉄プロセスの新たな 取り組み	粉体技術（（一社） 日本粉体工業技術 協会	あり	2020年10月

b. 口頭発表

番号	発表者	タイトル	発表誌名	発表年月
1	佐藤 道貴	フェロコークス製造・ 利用技術のこれまでの 開発経緯と今後の展開	（独）日本学術振興会学振 54 委（平成 30 年度 12 月期：第 193 回）	2018年12月 6日
2	東北大学) 小野 祐耶, M. Ramdzuanny, 齋藤泰洋, 松下 洋介, 青木秀 之, 神戸製鋼) 宍戸貴洋	粒子の摩擦抵抗が石炭 の成型過程に及ぼす影 響に関する数値解析	日本鉄鋼協会第 177 回春季講 演大会	2019年3月 20日
3	廣池 承一郎 藤本 英和 庵屋敷 孝思 榎枝 成治 佐々木 成人	DEM 解析による乾留 炉内の成型物分布評価	日本鉄鋼協会第 177 回春季講 演大会	2019年3月 20日
4	拜司 裕久	CO2 Reduction Technology of JFE Steel	World Steel Association Technology Committee Meeting	2019年6月 13日
5	藤本 英和 永山 幹也	環境調和型プロセス技 術の開発／	日本鉄鋼協会第 178 回秋季講 演大会	2019年9月 12日

	廣池 承一郎 庵屋敷 孝思 佐藤 道貴	フェロコークス技術の 開発		
6	永山 幹也 藤本 英和 庵屋敷 孝思 佐藤 道貴	低品位原料を使用した フェロコークス製造技 術の開発	日本鉄鋼協会第 178 回秋季講 演大会	2019 年 9 月 12 日
7	廣池 承一郎 藤本 英和 庵屋敷 孝思 佐藤 道貴	フェロコークス原料の 混合解析	日本鉄鋼協会第 178 回秋季講 演大会	2019 年 9 月 12 日
8	神戸製鋼) 和田 祥平, 宍戸貴 洋, 堀康爾, 奥 山憲幸	フェロコークス用バイ ンダーの開発	日本エネルギー学会第 56 回石 炭科学会議	2019 年 10 月 29-30 日
9	岩井 祐樹 佐藤 健 庵屋敷 孝思 佐藤 道貴	Evaluation of Ferro- coke Reaction Behavior in Blast Furnace	SIPS2019 Usui International Symposium	2019 年 10 月 25
10	東北大学) 小野 祐耶, M. Ramdzuan, Y., 松下洋介, 青木 秀之, 神戸製 鋼) 宍戸貴洋, 和田祥平	新規固形および新規液 体バインダーの冷間強 度発現機構の解明	International Conference on Coal Science & Technology (ICCS&T2019)	2019 年 11 月 24 日
11	神戸製鋼) 和田 祥平	フェロコークス技術の 開発-新バインダーの適 用検討-	石炭・炭素資源利用技術第 148 委員会 第 173 回研究会	2020 年 2 月 5 日
12	東北大学) 小野 祐耶, 松下洋 介, 青木秀之, 神戸製鋼) 和田 祥平, 宍戸貴洋	石炭成型物の充填率に 影響を及ぼす因子に関 する数値解析的検討	日本鉄鋼協会第 179 回春季講 演大会	2020 年 3 月 17 日
13	東北大学) 小野 祐耶, 松下洋 介, 青木秀之, 神戸製鋼) 和田 祥平, 宍戸貴洋	石炭成型物の充填率に 影響を及ぼす因子に関 する数値解析的検討	日本鉄鋼協会第 180 回秋季講 演大会 (オンライン) 179 回春季講演大会の再掲載	2020 年 9 月 16 日
14	東北大学) 中村 友亮, 小野祐耶 松川嘉也, 松下 洋介, 青木秀之 神戸製鋼) 和田 祥平, 宍戸貴洋	水またはバインダーの 添加が石炭成型物の成 型過程およびその強度 に及ぼす影響	第 57 回石炭科学会議 (オン ライン開催)	2020 年 10 月 27~28 日

c. 新聞・雑誌リスト

番号	新聞・雑誌名	記事タイトル	発表年月
1	週刊東洋経済	CO2 大量排出産業の宿命 鉄鋼が挑む脱炭素の壁	2020 年 8 月 1 日
2	日本経済新聞電子版	JFE、CO2 排出を 2 割削減へ	2020 年 9 月 15 日

3	日本経済新聞電子版	JFE スチールと NEDO、フェロコークス製造のための中規模設備の実証試験を開始	2020 年 10 月 12 日
4	10/13 鉄鋼新聞	新高炉原料「フェロコークス」開発 中規模プラントで実証試験開始 製鉄プロセスで CO2 10%削減	2020 年 10 月 13 日
5	日刊工業新聞	フェロコークス設備完成 CO2・エネ消費削減実証	2020 年 10 月 13 日
6	日刊産業新聞	フェロコークス中規模設備実証試験を開始 エネ・CO2 10%削減へ	2020 年 10 月 13 日
7	日本金属通信	フェロコークス製造実証開始 CO2 とエネ消費 10%削減	2020 年 10 月 13 日
8	山陽新聞(地方経済面)	フェロコークス 福山で実験開始 鉄鋼生産効率化、CO2 抑制	2020 年 10 月 13 日
9	日経ビジネス電子版	鉄鋼業界で広がる CO2 削減目標	2020 年 10 月 14 日
10	中国新聞	CO2 排出減期待の原料フェロコークス JFE 福山で実証実験 NEDO と共同 10%削減目指す	2020 年 10 月 14 日
11	日刊自動車新聞	CO2 排出抑制 高炉原料製造設備が稼働	2020 年 10 月 15 日