

「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」

中間評価報告書（案）概要

目 次

分科会委員名簿	1
評価概要（案）	2
評点結果	4

はじめに

本書は、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき研究評価委員会において設置された「環境調和型プロセス技術の開発／②フェロコックス技術の開発」（中間評価）の研究評価委員会分科会（2020年11月17日）において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、第64回研究評価委員会（2021年3月1日）にて、その評価結果について報告するものである。

2021年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会「環境調和型プロセス技術の開発
／②フェロコックス技術の開発」分科会
（中間評価）

分科会長 河瀬 元明

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究評価委員会
「環境調和型プロセス技術の開発／②フェロコックス技術の開発」

(中間評価)

分科会委員名簿

(2020年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科 会長	かわせ もとあき 河瀬 元明	京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 教授
分科 会長 代理	すがわら かつやす 菅原 勝康	秋田大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻 教授
委員	おくむら けいじ 奥村 圭二	名古屋工業大学 大学院工学研究科 物理工学専攻 准教授
	おざき じゅんいち 尾崎 純一	群馬大学 大学院 理工学府 元素科学国際教育研究センター 教授／センター長
	かくた ゆうすけ 角田 雄亮	日本大学 理工学部 物質応用化学科 准教授
	しのたけ あきひこ 篠竹 昭彦	帝京大学 理工学部 機械・精密システム工学科 教授 ／学科長
	なりた のぶひこ 成田 暢彦	愛知学院大学 総合政策学部 非常勤講師

敬称略、五十音順

「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」(中間評価)

評価概要 (案)

1. 総合評価

鉄鋼業においてCO₂排出量低減、省エネ化促進の要求を満たす技術開発が不可欠なので、本事業は重要である。また、適宜、実施計画を見直すなど、研究開発の推進が適正に行われている。主要鉄鋼会社が、フェロコークス製造、高炉での使用、新バインダーの開発、導入効果の評価を適切に分担し成果を上げており、実用化・事業化が期待できる。省エネ、CO₂削減に与える効果が大きいだけでなく、低品位石炭、低品位鉱石の利用が可能であり、さらに経済効果が見込まれる事から、日本の鉄鋼業の優位性を堅持できると思われる。

一方、要素技術によっては課題が残っている。高炉内使用技術では、省エネ目標を達成できる使用量より少ない使用量での試験計画であり、使用量が大きい場合の評価精度を上げる工夫が必要である。また、製鉄工程の下工程のエネルギー消費を考慮した技術開発の検討も望まれる。

CO₂排出削減量の要求が急激かつ大きくなっており、事業化の加速化を考えてもよいと思われる。海外展開も視野に入れた事業化を検討すべきであり、それに向けた特許、ノウハウの蓄積が必要である。また、本事業の意義を広く一般に説明し、他の国プロと併せてどのように脱炭素化シナリオに貢献できるかを発信する事が望まれる。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

鉄鋼業において、地球温暖化対策としてのCO₂排出量低減、低品位資源有効利用、省エネ化促進の要求を満たす製鉄技術開発が不可欠である。その上、本事業は国際競争力の優位性を堅持でき、また経済性も改善されるので、本事業の目的は妥当である。さらに、世界で最も省エネの進んだ日本の製鉄所で一層の省エネを実現する技術開発を、民間企業が単独で行う事は、設備投資と開発リスクの観点から困難であり協働が望まれる上、公共性が高い事から、NEDOの関与は妥当である。

一方、CO₂排出量低減の要求増大に対して速度感が合わず、実用化・事業化時期が遅くなる懸念がある。また、炭素価格などの環境経済的な目標設定がないので、普及時のインパクト等が、現時点では評価しにくいと思われる。

2. 2 研究開発マネジメントについて

フェロコークス製造、高炉での使用、新バインダーの開発といった個別テーマの達成目標は、具体的で明確である。各テーマを適切な実施者が担当しており、将来の規模拡大も見通した要素技術が網羅されている。無理のないスケジュールで計画され、オールジャパンで事業を行っている。技術検討委員会など進捗管理体制は整っており、健全な研究開発が進めら

れている。

一方、製造技術開発に他実施項目からのフィードバックによる計画修正がないなど、各要素技術担当者間の連携が弱いと思われる。また、社会・経済・政策・技術の変化は急激なので、技術の取捨選択や融合、実施体制見直し等の積極的な実施や、海外展開を視野に入れた知的財産戦略が望まれる。さらに、他の国プロの各種技術開発要素との組合せによる将来像を検討し、今後のビジョンを議論し公開される事を期待する。

2. 3 研究開発成果について

フェロコークス製造技術では、実機に転用できる製造装置を建設し、所望の製造に成功し、低品位石炭、低品位鉱石の活用可能性も実証された。高炉での使用では、実際設備での装入に見通しが立った。新バインダー製造では、既存原料試験により方法論を確立した。導入効果の評価では省エネ効果が認められた。重要な技術的知見も得られた。上記から中間目標を達成していると評価でき、最終目標達成に向けて着実に遂行されている。

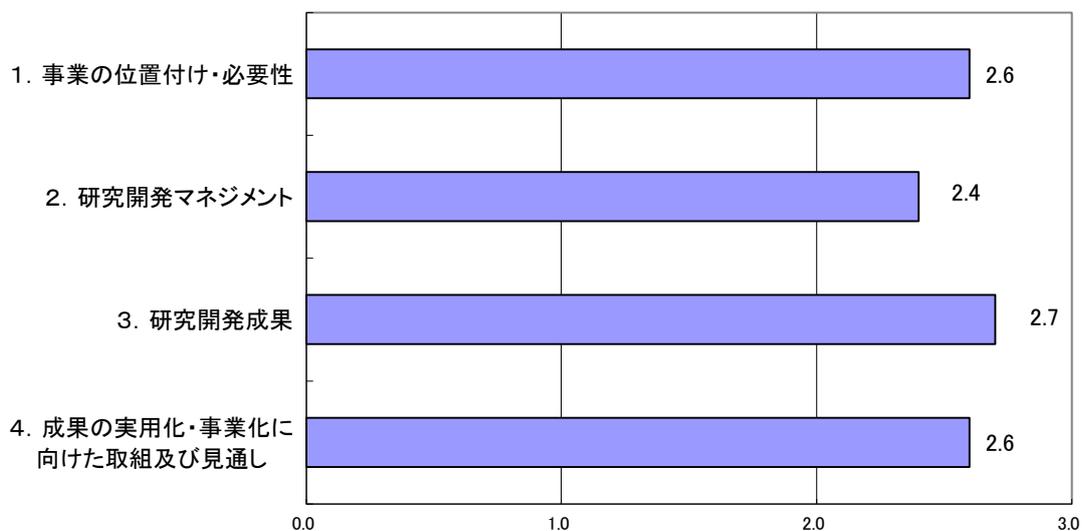
一方、フェロコークス高炉内使用の実証は、実高炉では投入量が制限され、多量投入時のシミュレーションが重要となるため、予測精度を上げる工夫を施し、使用データの適用性・信頼性について十分に確認する必要がある。また、製鉄工程の下工程ではエネルギー消費量の補填によって CO₂ 排出量が増大しているので、下工程を考慮した技術開発の検討が望まれる。さらに、成果は世界初であり、他国でも同様の技術開発が進む事から、国際協力とともに適切な知的財産保護が求められる。

2. 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

製造技術の開発、製造原料の拡大、高炉での使用試験、新バインダー製造法の開発、導入効果の試算という実用化・事業化に向けた戦略は妥当であり、着実に成果をあげている。製鉄は生産規模が大きく日本全体の省エネ、CO₂ 削減の効果や経済効果は大きいため、将来有望な技術である。主要鉄鋼会社の実施者となっており、実用化・事業化は実行されるものと判断できる。

一方、高炉でのフェロコークス実使用は試験規模が小さく、新バインダー製造ではフェロコークス乾留で生じるタールの利用等の課題がある。また、国内高炉の何割までの使用を考えるのか、普及促進に必要な事は何か、等を明示し、脱炭素化実現シナリオにおける本技術の立ち位置を、一般市民に向けてアピールする事が望まれる。さらに、従来の高炉設備をそのまま利用できるメリットが大きく、海外の既存プロセスにおいても導入できるので、海外展開も視野に入れた事業化を検討するのがよいと思われる。今後、地球温暖化に対する規制は強化されるので、開発を加速して頂きたい。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	A	C	B	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.6	A	A	A	A	A	C	B	
2. 研究開発マネジメントについて	2.4	B	A	A	B	A	C	A	
3. 研究開発成果について	2.7	A	A	A	A	B	B	A	
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	2.6	A	A	A	A	B	C	A	

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算値に換算し算出。

〈判定基準〉

1. 事業の位置付け・必要性

- ・非常に重要 →A
- ・重要 →B
- ・概ね妥当 →C
- ・妥当性がない、又は失われた →D

3. 研究開発成果

- ・非常によい →A
- ・よい →B
- ・概ね妥当 →C
- ・妥当とはいえない →D

2. 研究開発マネジメント

- ・非常によい →A
- ・よい →B
- ・概ね適切 →C
- ・適切とはいえない →D

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

- ・明確 →A
- ・妥当 →B
- ・概ね妥当 →C
- ・見通しが不明 →D

◆事業実施の背景と事業の目的

社会的背景

- ✓ 日本の鉄鋼業の省エネルギーポテンシャルは世界で最も低い。
- ✓ 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15%を占める(2017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。

さらなる省エネルギー、CO₂削減を目指すためには革新的な製鉄技術が必要



事業の目的

- フェロコークスの使用により、鉄鉱石の還元を効率化し、製鉄工程における省エネルギー効果、CO₂削減効果の検証を行う
- 中規模設備(フェロコークス製造能力:300t/d)による製造技術開発
 - 高炉へのフェロコークス装入による省エネルギー効果10%の検証

◆政策的位置付け

■エネルギー基本計画 (2010年 6月)

【世界最高の省エネ・低炭素技術の維持強化】

革新的製鉄プロセス技術(フェロコークス)や環境調和型製鉄プロセス技術(水素還元製鉄、高炉ガスCO₂分離回収)について研究開発を推進し、2030年までの実用化を図る。

フェロコークス: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材)及びその操業プロセスを開発し、製鉄プロセスの省エネルギーと低品位原料利用拡大の両立を目指す革新的技術。

■地球温暖化対策計画 (2016年 5月)

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。

◆政策的位置付け

Ⅲ. 産業

水素 CC

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）

⑯ 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⁾

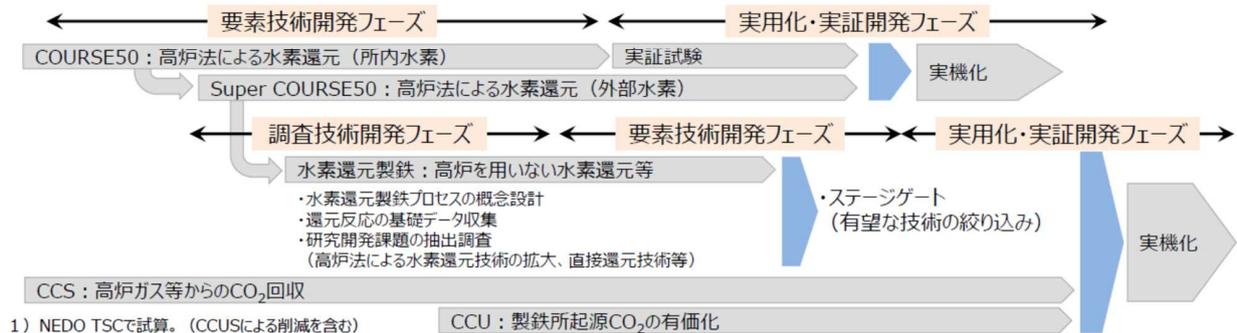
【技術開発】

・「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。

・COURSE50及びフェロコー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の拡大技術（COURSE50技術の拡大）、直接還元法による水素還元製鉄技術、CCU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。



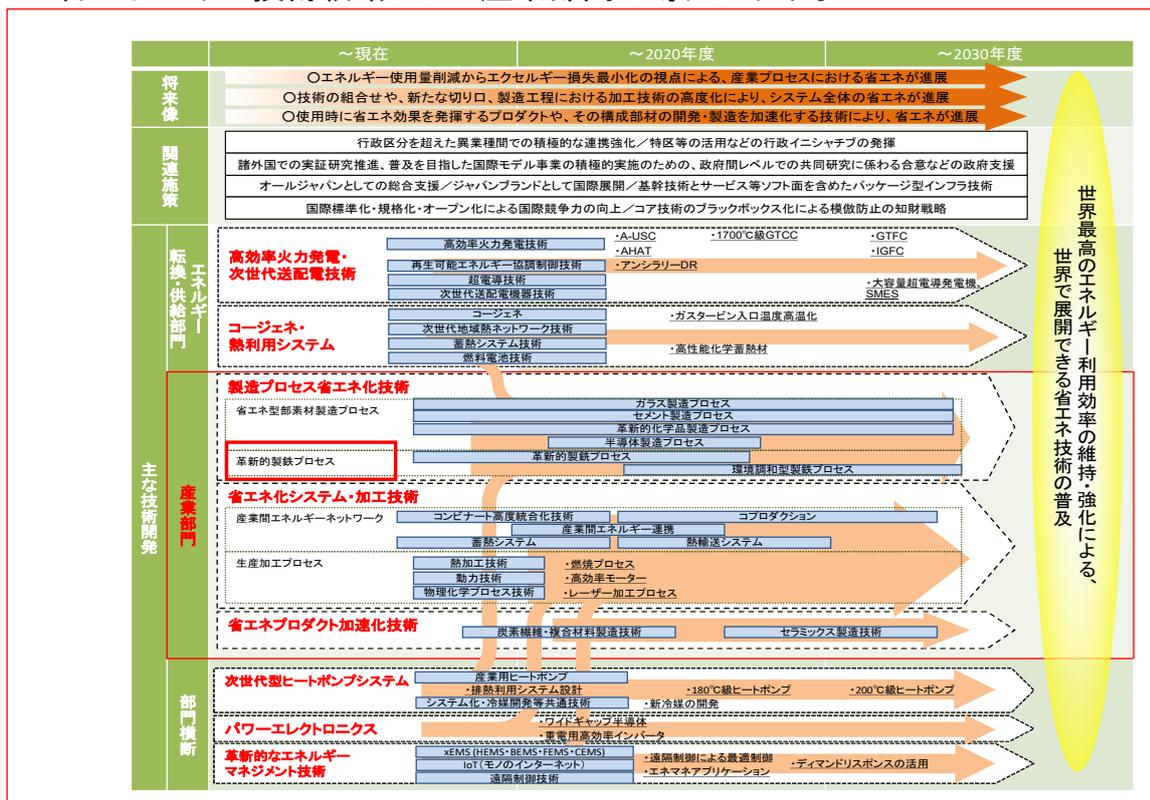
1) NEDO TSCで試算。（CCUSによる削減を含む）

CCU：製鉄所起源CO₂の有価化

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

◆技術戦略上の位置付け

■省エネルギー技術戦略2016 産業部門の導入シナリオ



◆技術戦略上の位置付け

省エネルギー技術戦略2016

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が、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

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、新たな化学吸着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回収技術シーズ調査を完了し、CO2分離回収可能量・コストの検討を実施したほか、実機の製鋼スラグから顕熱を回収するベンチ設備を製作し、製鋼スラグ顕熱回収の可能性を確認した。また、カーナ発電システムの熱効率改善と低コスト化の可能性を明確化した。

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年後半までには研究開発を行い、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。

波及効果

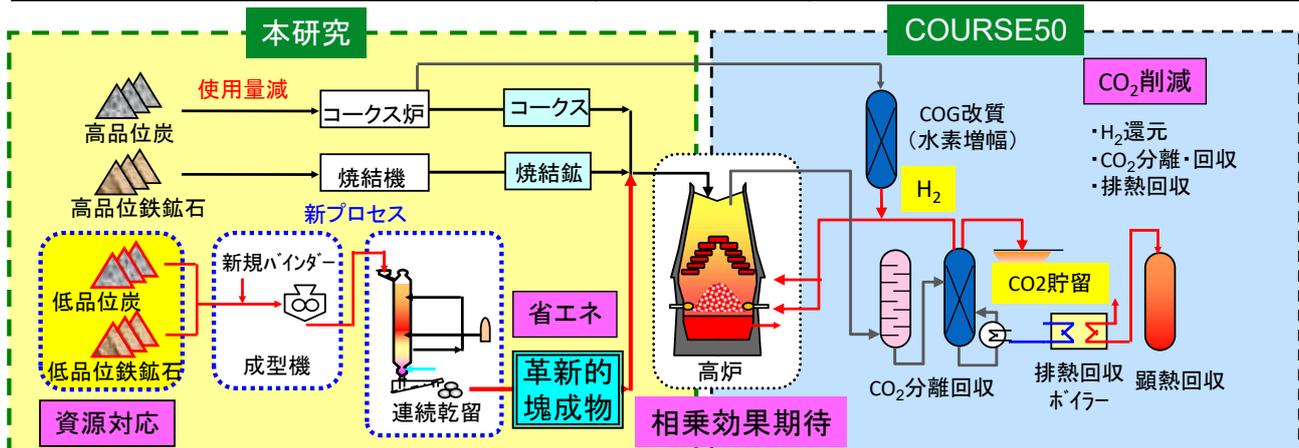
資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発も環境調和型製鉄プロセス（水素還元技術および未利用排熱活用高炉ガスCO2分離回収技術等）のいずれの技術も、省エネルギーと同時にCO2削減に寄与する。長期的にはCCS技術を組み合わせることによりCO2排出量抑制を図ることができる。

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。

◆他事業との関係

基本計画「環境調和型プロセス技術の開発」のもとに2つのプロジェクトが実施されている

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）



2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆研究開発の目標と根拠

研究開発項目:フェロコークス中規模設備での製造技術実証

a1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

a2複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

中間目標(2020年度)	最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・300t/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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 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。強度と混合度の関係を調査し、必要なフェロコークスの強度を確保するため、混合度95以上を目標値とした。 ➢ 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。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。
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(ラボ実験)	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: $DI150/15 \geq 80$ (ラボ実験)	指標2:乾留後塊成物のドラム強度: $DI150/15 \geq 80$	$DI150/15$ ドラム強度:JISK2151で規定される試験方法。

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆研究開発の目標と根拠

研究開発項目:一般炭、低品位原料使用時の製造技術

中間目標(2020年度)	最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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。 	<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。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 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。
指標:成型物の強度(I型ドラム強度): $ID30/15 \geq 85$ (ラボ実験)	指標:成型物の強度(I型ドラム強度): $ID30/15 \geq 85$	$ID30/15$: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)

◆研究開発の目標と根拠

研究開発項目: 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

中間目標(2020年度)	最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<p>・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。</p> <p>・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。</p>	<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作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、フェロコークス導入効果の検証で開発した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。</p>	<p>➤ 設定理由(2020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):</p> <p>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。</p> <p>➤ 設定理由(2022年度)(連続操業試験: 30日以上):</p> <p>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。</p>
<p>指標: 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を確認する。</p>	<p>指標: 連続操業試験: 30日以上</p>	

◆研究開発の目標と根拠

研究開発項目: 新バインダー強度発現実証

中間目標(2020年度)	最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<p>・中規模設備に供し得る新規固形バインダーを試作する。</p> <p>・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。</p> <p>・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。</p>	<p>・新規固形バインダーの実証技術開発計画案を提示する。</p> <p>・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。</p> <p>・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。</p>	<p>➤ 設定理由:</p> <p>フェロコークス普及時には従来の石油由来のバインダーであるASP(石油精製副産物)、SOP(コークス炉副産物)では量が不足することから、代替バインダーの開発を実施。バインダー特性は、フェロコークスの成型後、乾留後の強度が満足されるものと設定。</p>
<p>指標: 液体新規バインダーの製造オプションの提示。</p>	<p>指標:</p> <p>成型物の強度(I型ドラム強度): ID30/15 ≥ 85</p> <p>乾留後塊成物のドラム強度: DI150/15 ≥ 80</p>	

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆ 研究開発の目標と根拠

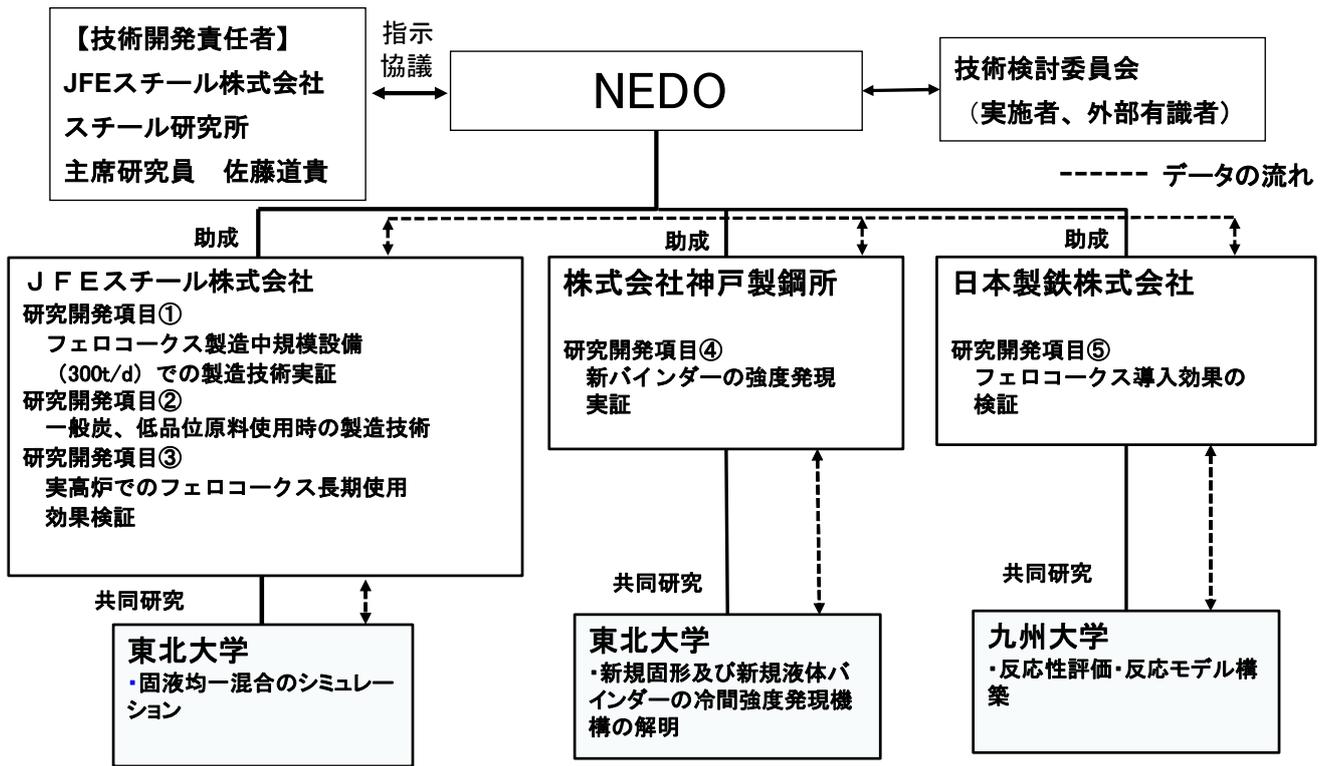
研究開発項目：フェロコークス導入効果の検証		
中間目標(2020年度)	最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<p>・中規模設備で製造したフェロコークスの高温性状の調査を実施する。</p> <p>・開発した新規固形バインダーと新規液体バインダーを用いてラボスケールで作成したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルに組み入れる。</p>	<p>・フェロコークスの実高炉使用時の操業結果を数学モデルを用いて高精度にシミュレートする。</p> <p>・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。</p>	<p>➤ 設定理由(2020年度): フェロコークスの高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ことによる。</p> <p>➤ 設定理由(2022年度): 省エネ効果の検証するために、高炉内での挙動を明確化し、汎用高機能高炉内反応シミュレーターの精度を向上させる。</p>
<p>指標: 高温性状調査結果と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。</p>	<p>指標: 評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認(数値シミュレーションと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。</p>	

2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

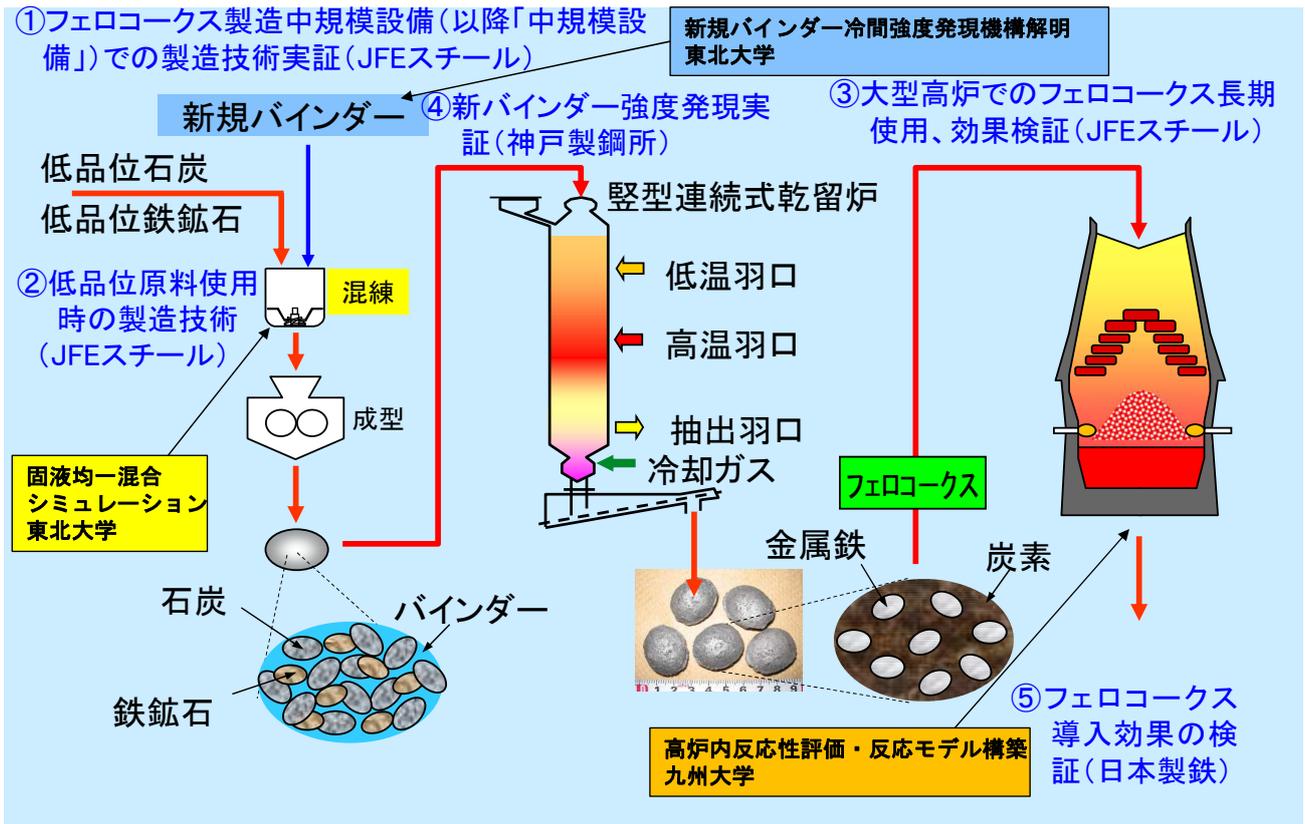
◆ 研究開発スケジュール

技術開発項目	担当	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
①中規模設備での製造技術実証	JFE 東北大				100t/d	200t/d	300t/d
②一般炭、低品位原料使用時の製造技術	JFE				設計、建設	製造実証	
③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証	JFE				ラボスケール成型・乾留試験	成型条件	
					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	神鋼 東北大				<固形> ラボ検討	試作製造	評価
					<液体> 性状分析 基礎調査	試作製造	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	
予算(億円)		8.3	20.7	25.1	25.1	(7.8)	(8.7)

◆研究開発の実施体制



◆研究開発の実施体制



2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

◆プロジェクト費用

(百万円)

研究開発項目	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	合計
フェロコークス中規模設備での製造実証	357	822	799	895	(302)	(339)	(3,514)
一般炭,低品位原料使用時の製造技術	437	1193	1577	1144	(382)	(428)	(5,165)
実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証	3	44	108	450	(76)	(85)	(766)
新バインダー強度発現実証	29	11	16	8	(12)	(6)	(83)
フェロコークス導入効果の検証	2	5	6	6	(8)	(8)	(32)
合計	828	2,077	2,506	2,506	(779)	(865)	(9,560)

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義(個別課題)

■ 成果

	2017年												2018年												2019年												2020年									
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
全体工程	▼工事開始			既設撤去			基礎工事						土木付帯						段取り						据付工事(機械・制御・炉材)						試運転						試験操業									
				掘削			杭打ち						(一時中断)						冷却塔基礎						乾留炉築炉						無負荷						負荷									



撤去工事後(更地)



杭打ち(350本)



基礎工事(コンクリート4,600m3)



架構築て方



機器据付(機械重量7,000t)



工事完了

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。

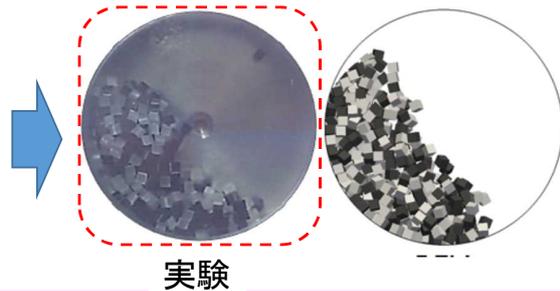
■ 成果

GPU(Graphics Processing Unit/画像処理装置)

技術開発項目	担当	2018年度				2019年度				2020年度				21年度	22年度
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q		
(1)比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立	JFE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	東北大 ラボ計算機	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

<混合攪拌シミュレーション>

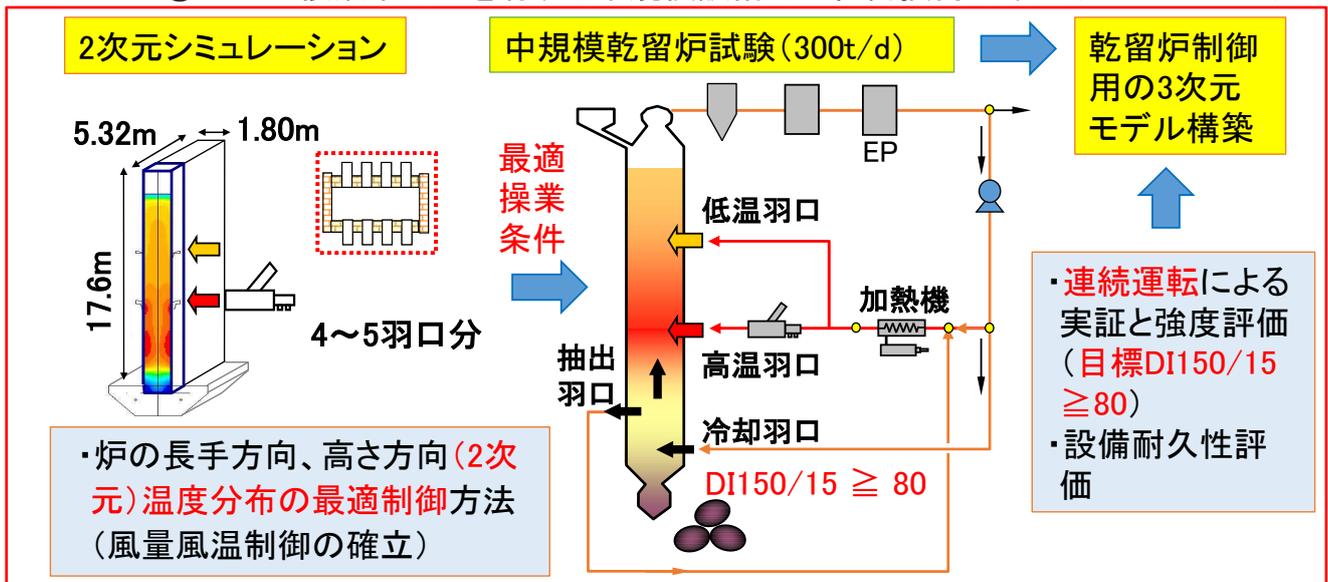
- 互いに接触した粒子間に働く接触力をモデル化
- 接触力が作用する個々の粒子の運動を記述する運動方程式を解き、粉体中の個々の粒子の挙動を追跡



- ・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。
- ・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。

①フェロコッ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)

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(JFEスチール)



■ 研究開発の中間目標

フェロコックスのドラム強度: JIS規格
 $DI_{150/15} \geq 80$ (現状より劣質原料使用。
 固形バインダー: ASP^{*}、液体バインダー
 はSOP^{*}使用)。^{*}市販品

■ 成果

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($DI_{150/15} \geq 80$ をクリア)。

■ 成果

技術開発項目	担当	2017年度				2018年度				2019年度				20年度	21年度	22年度
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q			
(2) 一般炭、低品位原料使用時の製造技術	JFE	●														
		ラボ成型・乾溜試験着手				成型物・フェロークス品質評価				長期使用原料				操業試験		
						① 低品位原料絞り込み								② 長期操業試験		
										③ カナダ 鉱石評価						

<低品位原料絞り込み>

	検討銘柄	適用可能
一般炭	6銘柄	4銘柄
PCI炭	3銘柄	3銘柄
鉱石	2銘柄	2銘柄

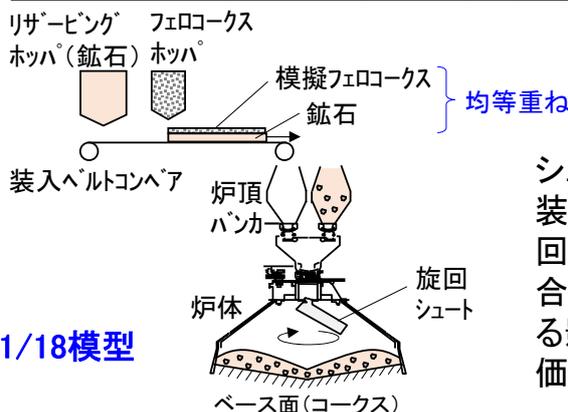
- ・選定した一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石1銘柄および従来品のバインダーを用いて、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認した(I型ドラム強度: ID30/15 ≥ 85)。
- ・ラボにて新規固形バインダー使用成型試験を実施し、強度評価を実施。

■ 今後の予定

選定した低品位原料を使用した中規模設備での長期操業試験の実施

■ 成果

技術開発項目	担当	2018年度				2019年度				2020年度				21年度	22年度
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q		
③ 実高炉でのフェロークス長期使用、効果検証	JFE														
						装入方法の探索				実炉装入方法提示					
						① 装入方法検討				② 使用、効果検証					



シュート角度、装入速度・旋回数等が混合性に与える影響を評価

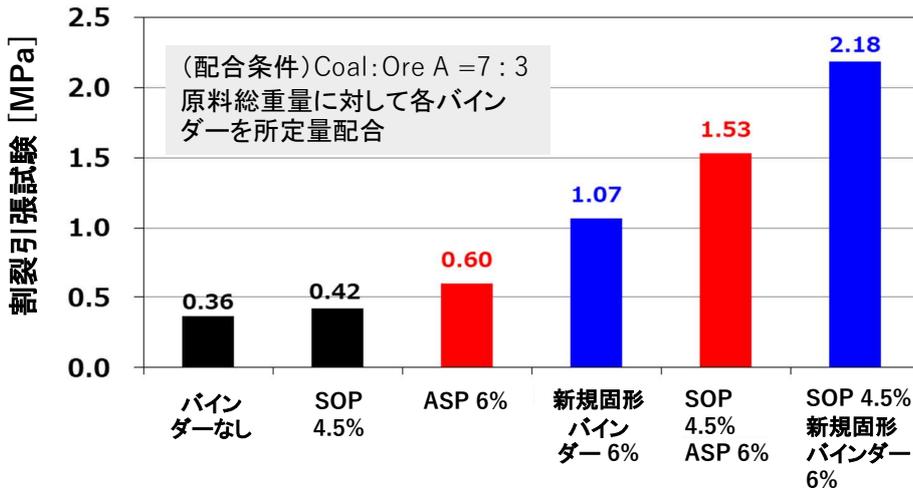
ラボ装入模擬試験に基づきフェロークスを実炉に装入するための適切な装入方法は、2019年度に完了。10月より100t/dの試験操業を開始。

■ 今後の予定

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。

■ 成果

◆ 新規固形バインダーの性能実証



新規固形バインダーは、単独、SOPとの組み合わせにおいて、何れの配合条件でもASPに比べて高い強度付与効果を有す。

・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°C、昇温速度150°C/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。

■ 今後の予定

新規固形バインダーを用いたフェロコークス製造試験を継続。新規固形バインダーの製造条件の改善。既存の固形バインダー(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化する。

④ 新バインダー強度発現実証(神戸製鋼所、東北大)

④-2 新規液体バインダー開発(神戸製鋼所)

■ 研究開発の中間目標

・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把握
 ・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。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。

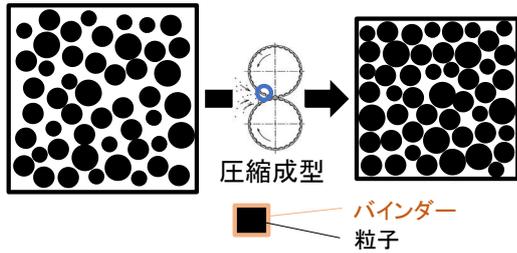
■ 成果 <フェロコークスタールの改質方法検討>

	改質方法(重質化)	狙い	特性変化
1	低沸点成分の除去	分画温度を変えることで軟化点等の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	重質成分である新規固形バインダーの混合比を変え熱処理することで、軟化点等の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利用。混合比を変えることで、軟化点等のバインダー特性を制御	○

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。

■ 成果

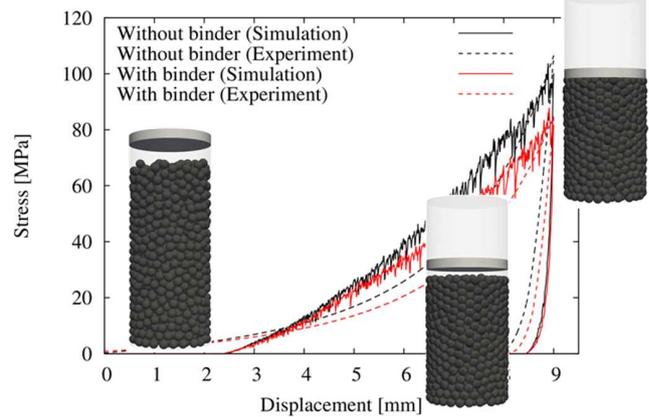
◆ フェロコクスブリケットの冷間強度予測モデル



- ◆ 成型時の粒子同士の滑り・再配置による構造変化の予測(バインダーによる潤滑性と接着力を考慮)
- ◆ 成型体の深さ方向の充填密度分布の予測

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実施中。

◆ 圧縮応力の変化(実験値と解析値の比較)



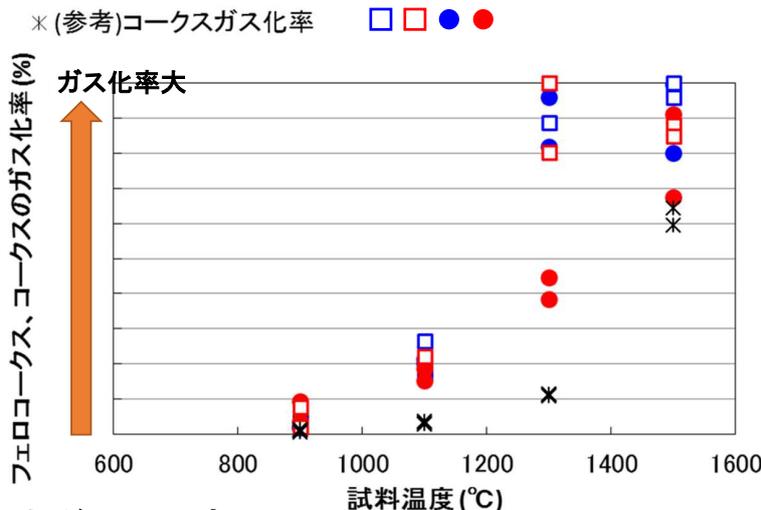
固形バインダーの配合に伴う応力の減少傾向を良好に表現

■ 今後の予定

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(解析結果の誤差: 10%以内見込み)。

■ 成果

◆ 実高炉の温度、ガス、荷重条件を模擬した荷重軟化試験におけるフェロコクスのガス化率の温度依存性



コークスと比較して低温からガス化反応が生じることを確認。

- ・一般炭、低品位原料で製造したフェロコ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。
- ・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(P26)。

■ 今後の予定

一般炭、低品位原料で製造したフェロコ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)。

⑤ フェロコクス導入効果の検証(日本製鉄、九大)

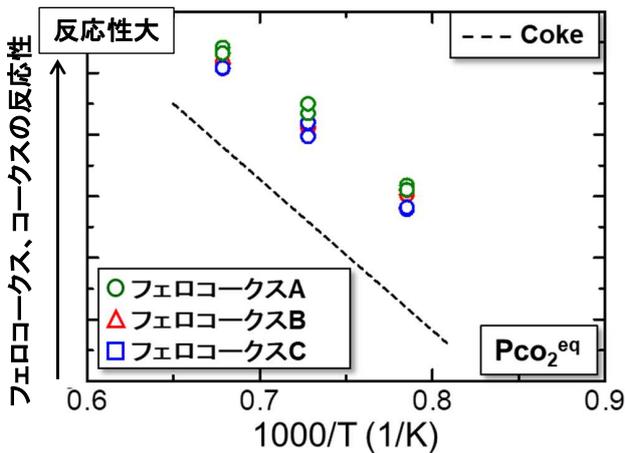
⑤-2 反応性評価・反応モデル構築(九大)

■ 研究開発の中間目標

・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。

■ 成果

◆ 熱天秤試験におけるフェロコクスのガス化率の温度依存性

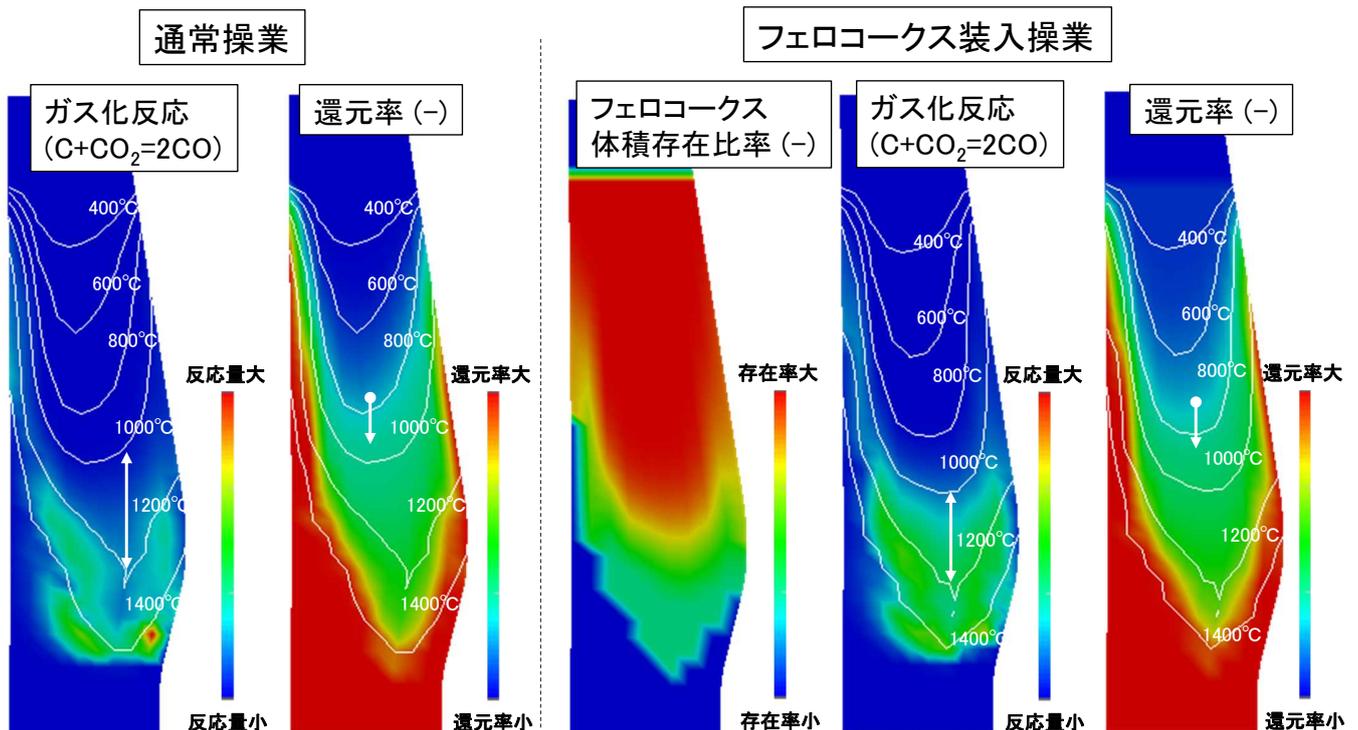


測定した反応速度をアレニウス型反応速度式として定式化し、フェロコクス製造条件が頻度因子、活性化エネルギーに及ぼす影響を評価。

一般炭、低品位原料で製造したフェロコ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。

◆ フェロコクス装入に伴う炉内状況変化

フェロコクス装入によって、低温でのガス化反応が促進され、炉内還元が促進されることを確認した。



◆成果の普及

※2020年度10月31日現在

	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

論文

- 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)」

口頭発表

- 2018年度12月(独)日本学術振興会学振54委員会(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」

雑誌掲載

- 週刊東洋経済(8/1号)

新聞発表

- 10/12～15 鉄鋼新聞、日経新聞電子版 など

◆知的財産権の確保に向けた取組

【戦略に沿った具体的取組】

- 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METI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
- 外国出願**:海外展開の可能性が高い国に優先的に出願。

※2020年度10月31日現在

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

○前段のプロジェクトにおける特許出願件数

フェロコークス製造技術、高炉装入技術などに関する特許

「革新的製鉄プロセスの先導的研究」 10件

「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」 17件

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\geq80（*）</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\sim30t/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\geq85</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	<p>【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～）</p> <p>【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</p>	
情勢変化への 対応	<p>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</p>		
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	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>		
	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>