

**「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」(終了時評価)
2017年度～2022年度 6年間**

プロジェクト／制度の概要 (公開版)

2023年11月20日

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

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

プロジェクトの概要

【背景】

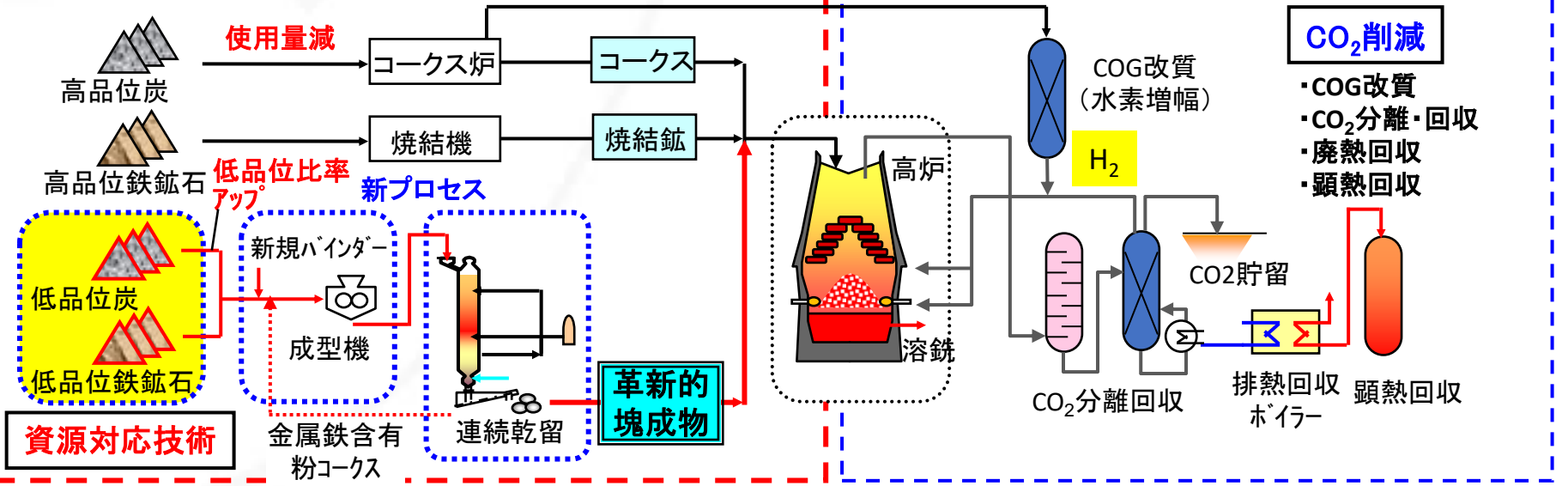
- ・地球温暖化対策として、我が国の産業部門で最大のCO₂排出業種である鉄鋼業からのCO₂削減が要求されている。
- ・我が国の製鉄技術は、既に世界最先端の水準にあり、CO₂削減を実現するためには革新的な製鉄プロセス技術開発が必要である。

【実施内容】(①水素還元型製鉄プロセス技術)

- ・12m3規模試験高炉を用いた送風操作及び炉内装入物の最適化
 - ・商用高炉を用いた全周羽口吹込による水素還元効果の部分検証及び3次元数学モデルの精度向上
 - ・STEP2に向けたシャフト吹込による水素還元効果の最適化検討
- #### (②フェロコークス活用製鉄プロセス技術)
- ・一般炭と低品位鉄鉱石を用い、金属鉄の触媒作用を利用して還元効率を高め、コークス量を削減できる省エネ技術を開発する。

②フェロコークス活用製鉄プロセス技術

①水素還元型製鉄プロセス技術



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



想定する出口イメージ等

アウトプット目標	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。
アウトカム目標	2030年頃までに(400万t/y高炉 5基へ適用)省エネルギー効果として原油換算量で19.4万kl/年、CO ₂ 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、約280億円/年の経済効果を見込む。
出口戦略 (実用化見込み)	①2030年までに商用機1号機に適用し、2050年までに国内全機に適用 ②2023年頃までに、実高炉(1基)において適用し、2030年頃までに中規模設備の増強、実用化を図り、実高炉5基へ適用
グローバルポジション	プロジェクト開始時:LD → プロジェクト終了時:LD

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



既存プロジェクトとの関係

①水素還元型製鉄プロセス技術

期間:2018年度～2022年度(5年間)

総事業費(NEDO負担分):46.4億円規模(委託)

②フェロコークス技術の開発

期間:2017年度～2022年度(6年間)

総事業費(NEDO負担分):96.1億円(1/2助成)

年	2008 ~12	2013 ~17	2018	2019	2020	2021	2022	2023 ~27
フェーズ/ STEP	フェーズⅠ STEP1 STEP2		フェーズⅡ STEP1 STEP2					
内容	要素 技術 開発	総合 技術 開発	試験高炉での 実証 全周羽口の 準備	製作	試験	コークス 準備 シャフト吹込 設計	高度 実用 化 技術 の開発	
			CO ₂ 分離 新吸収剤の 効率化	CO ₂ 分離技術 総合評価		マイクロ 熱交換器 改良器 設計・検証		
			マイクロ 熱交換器 検証					
評価時期		事前/ 事後			中間		事後	
予算(億円)	104	162	8.3 (P)	8.5 (P)	10.4 (P)	8.3 (P)	5.7 (P)	55.2 (P)

	H29 (2017)	H30 (2018)	H31 (2019)	H32 (2020)	H33 (2021)	H34 (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	↑			↑		
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(6年) (億円)	8.4	21.7(P)	26.5(P)	26.5(P)	8.4(P)	9.1(P)

＜評価項目1＞意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義 * 終了時評価においては対象外

(1)アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(2)知的財産・標準化戦略

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム(社会実装)達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 国内外の動向と比較
- 他事業との関係
- アウトカム(社会実装)達成までの道筋
- 非連続ナショプロに該当する根拠
- 知的財産・標準化戦略
- 知的財産管理

2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(※)受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外
事前・中間評価時の資料ページは残す

(塗りつぶしなし) 評価対象外

事業の性質や状況に応じて記載

2. 目標及び達成状況 (詳細) ※

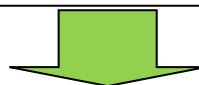
(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

事業の背景・目的・将来像

社会的背景

- ✓ 日本の鉄鋼業では省エネルギー対策が既に進んでいるので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



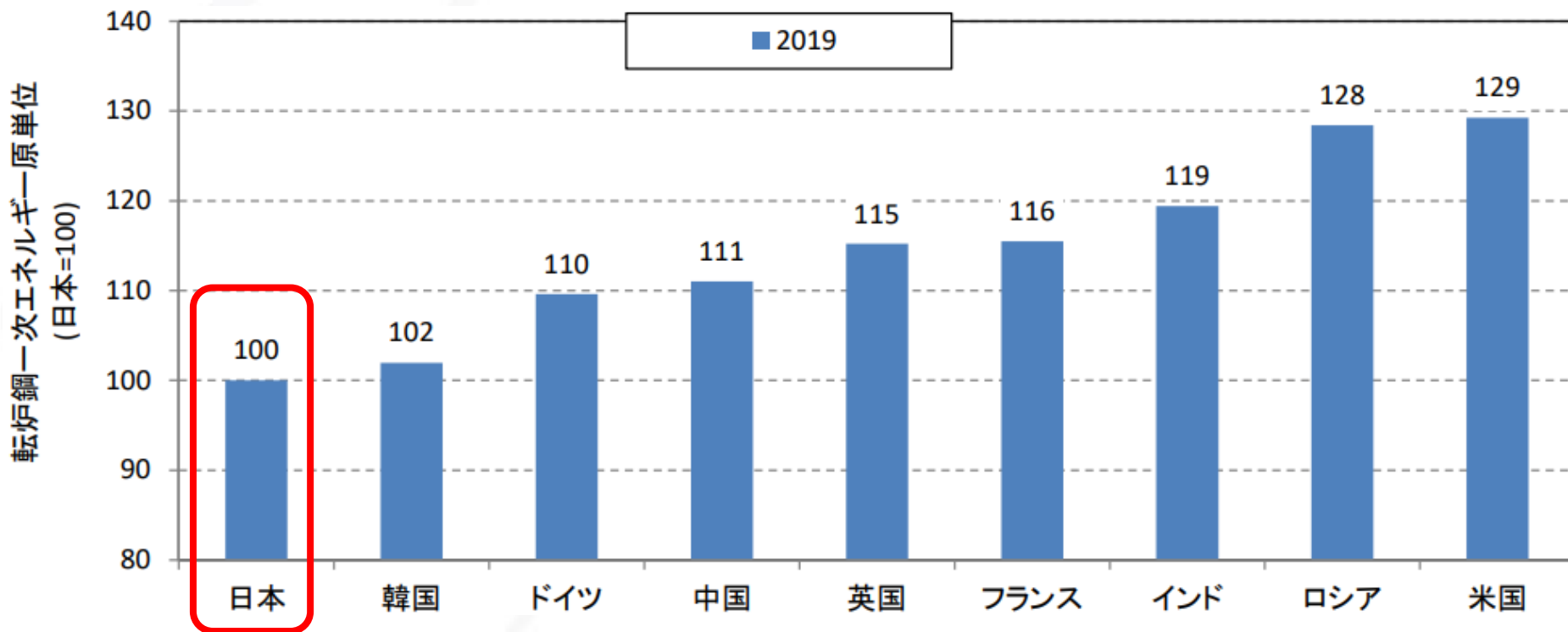
事業の目的

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

事業の背景・目的・将来像

日本の鉄鋼業は鉄鋼主要国の中で最もすぐれたエネルギー原単位と推計される

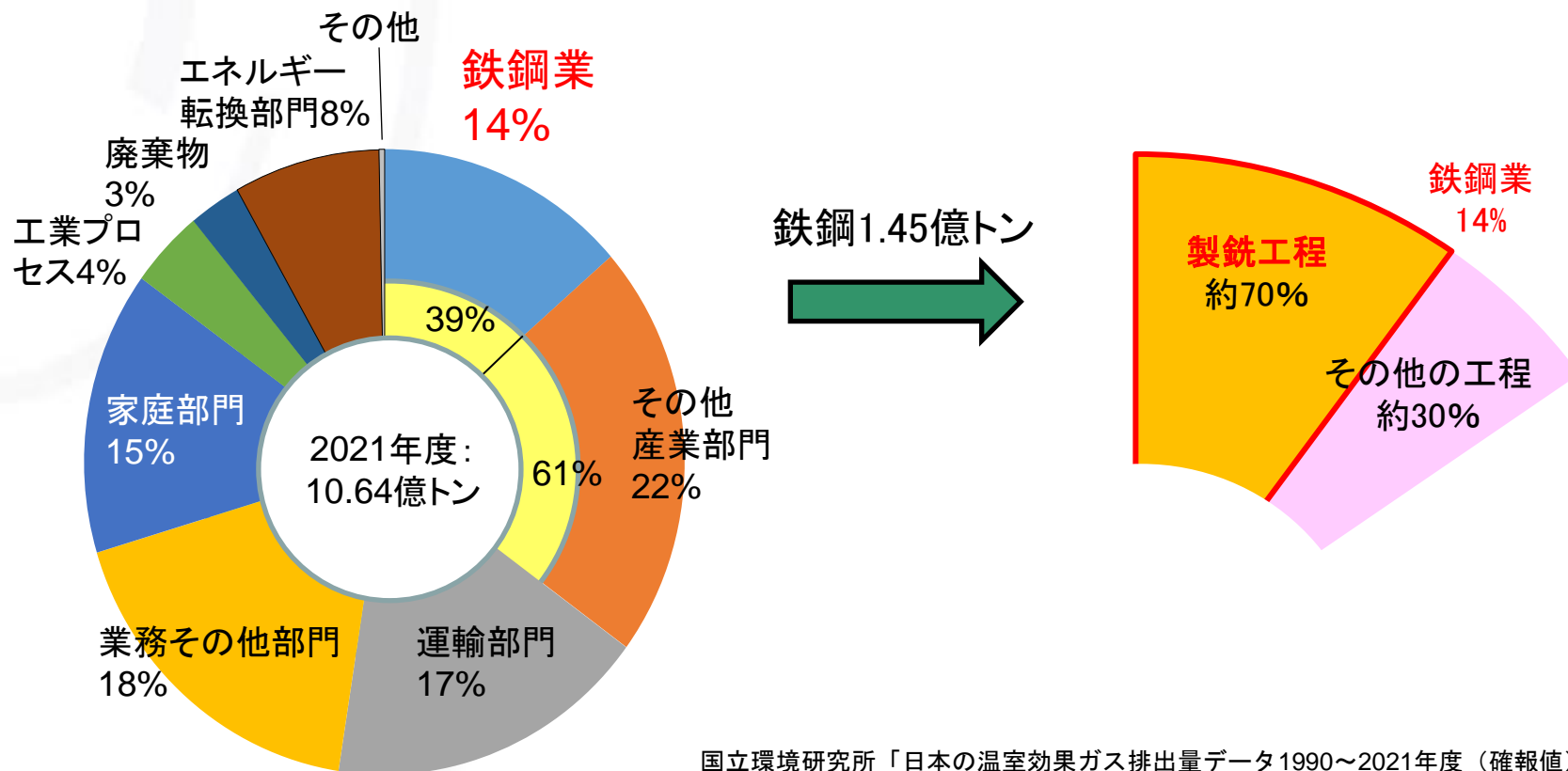


(エネルギー原単位:粗鋼製造1トン当たりのエネルギー投入量)

出典:(公益財団法人) 地球環境産業技術研究機構(RITE)「2019年時点のエネルギー原単位推計(鉄鋼部門・転炉鋼)」を改変 https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2019steel.pdf

事業の背景・目的・将来像

● 国内製造業における産業別のCO₂排出量割合



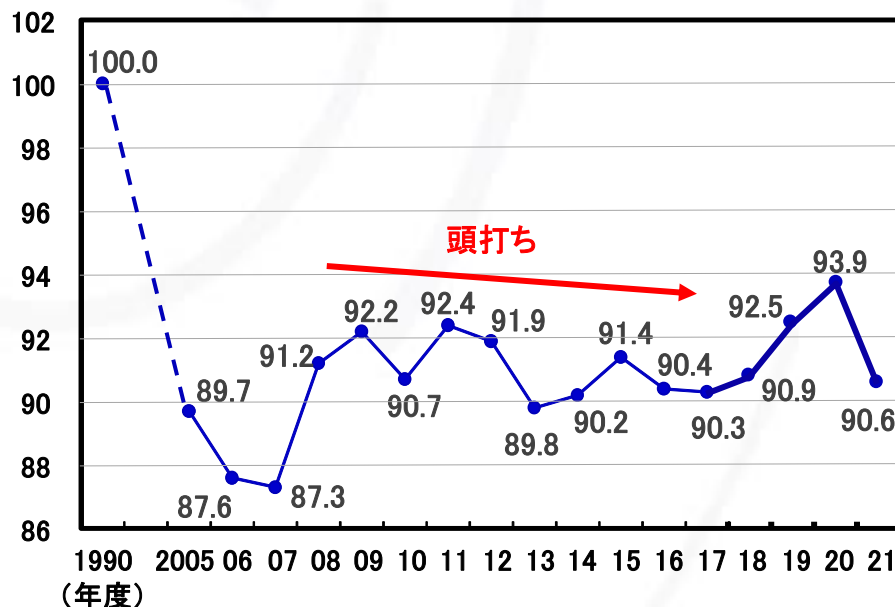
国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ1990～2021年度（確報値）」より作成 <https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>

高炉法による製鉄プロセス(製鉄工程)で発生するCO₂排出量の削減は喫緊の課題

事業の背景・目的・将来像

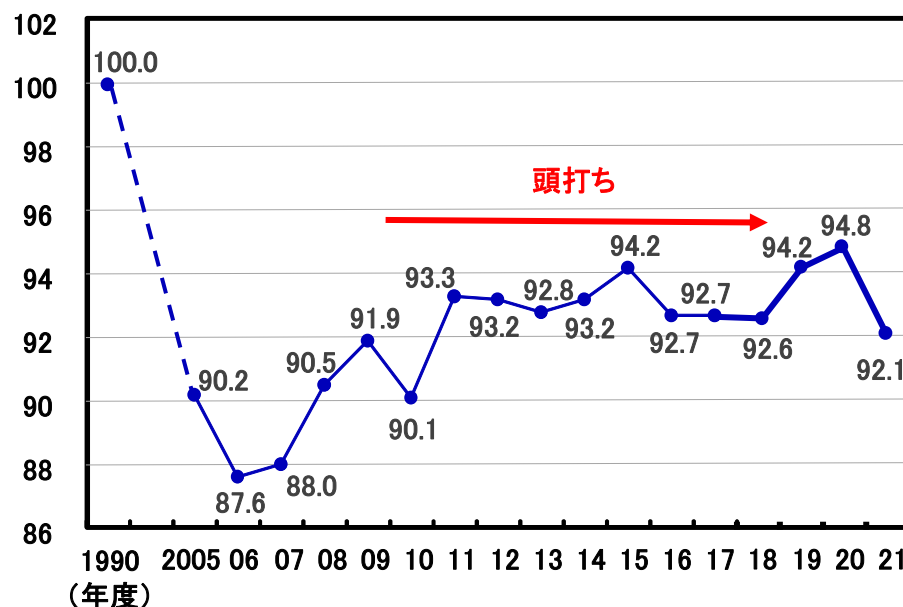
● 鉄鋼業におけるエネルギー消費・CO₂発生の推移

エネルギー原単位(1990年度基準)



(エネルギー原単位:粗鋼製造1トン当たりのエネルギー投入量)

エネルギー起源CO₂原単位(1990年度基準)
(毎年度のクレジット反映後の電力係数を反映)

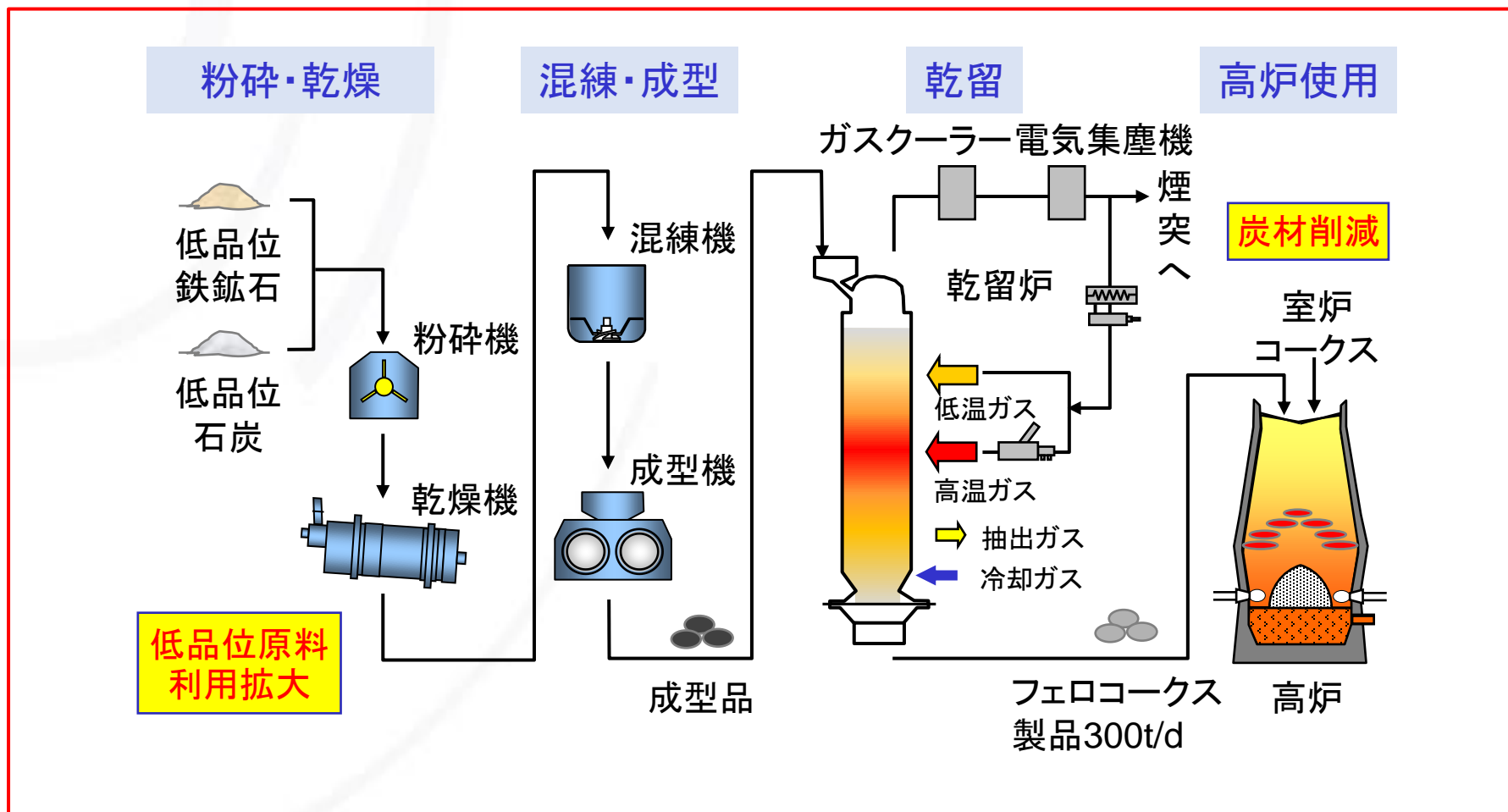


日本鉄鋼連盟: 産業構造審議会 鉄鋼WG報告資料
「地球温暖化対策への取組状況について
～カーボンニュートラル行動計画報告～」
2023年2月16日 一般社団法人 日本鉄鋼連盟

我が国の鉄鋼業の省エネルギーは極限→革新的製鉄プロセス技術開発が必要

事業の背景・目的・将来像

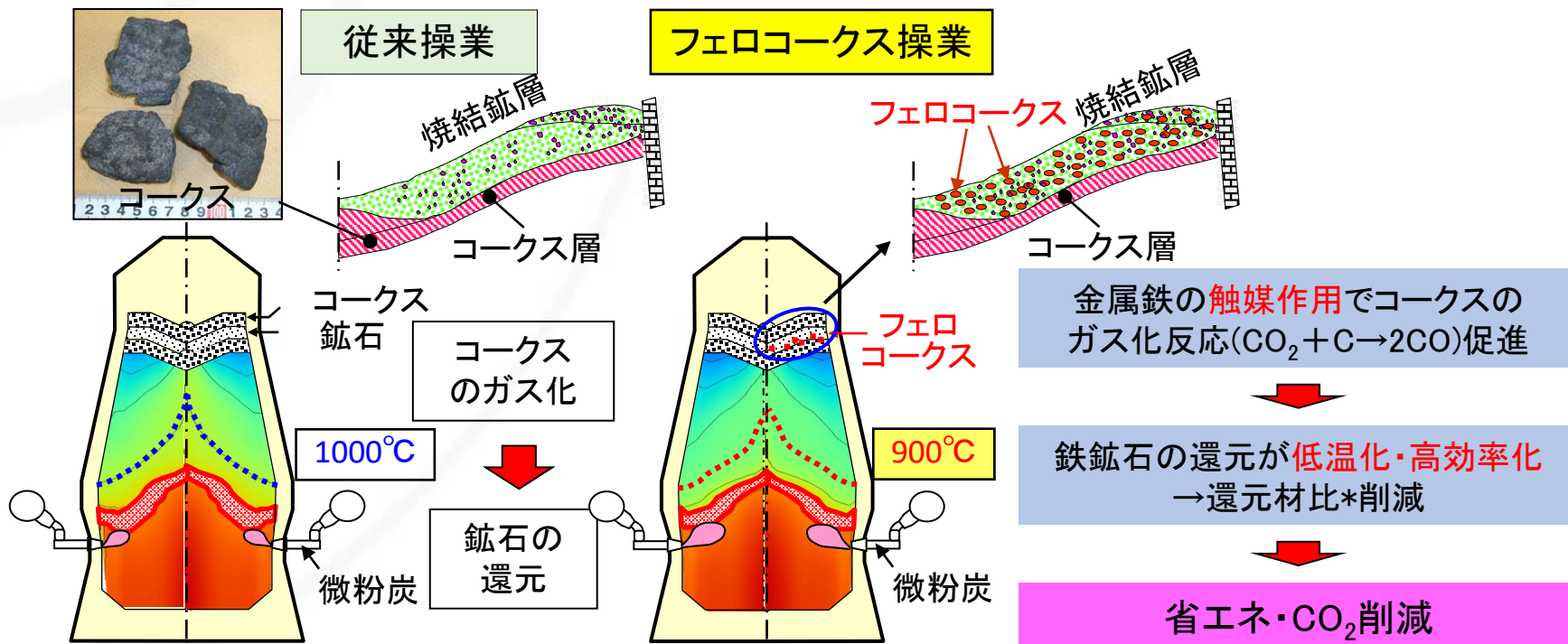
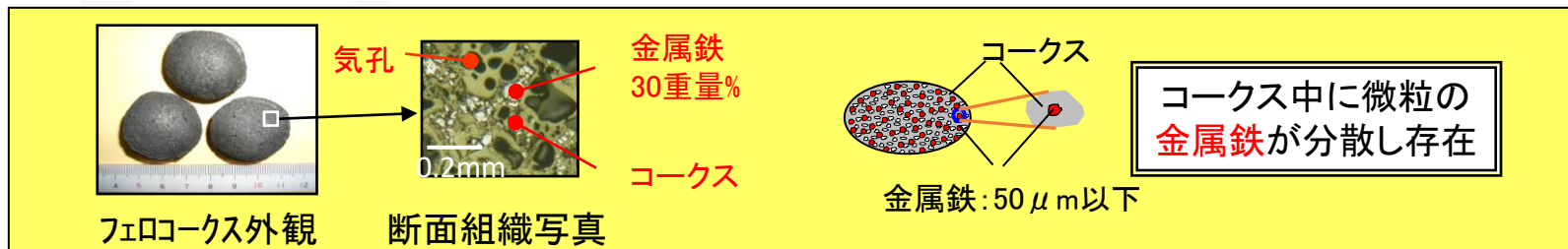
● フェロコークス製造プロセス



事業の背景・目的・将来像

● フェロコークスを用いた高炉操業

水素還元製鉄が普及するまでの間、トランジションの省エネ対策として活用



政策・施策における位置づけ

■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(フェロコックス)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。

フェロコックス: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ックス(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ックス代替還元材)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。

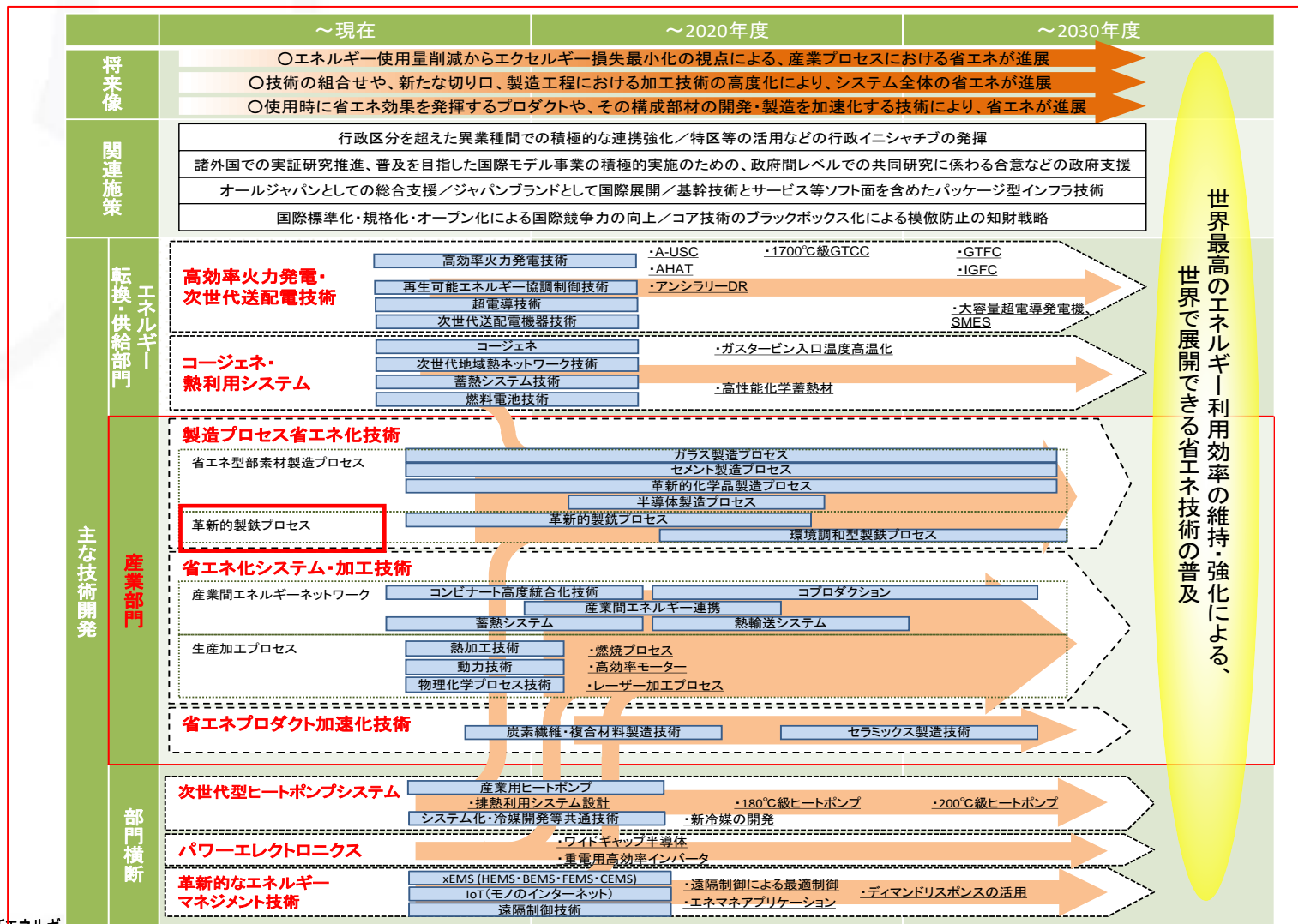
■地球温暖化対策計画（2016年 5月）

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。

出典:経済産業省 エネルギー基本計画(2010年6月)、環境省 地球温暖化対策計画(2016年 5月)より抜粋

技術戦略上の位置づけ

■ 省エネルギー技術戦略2016 産業部門の導入シナリオ



世界最高のエネルギー利用効率の維持・強化による、世界で展開できる省エネ技術の普及

技術戦略上の位置づけ

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・回収技術の開発を進める。

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・君津製鉄所において、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。

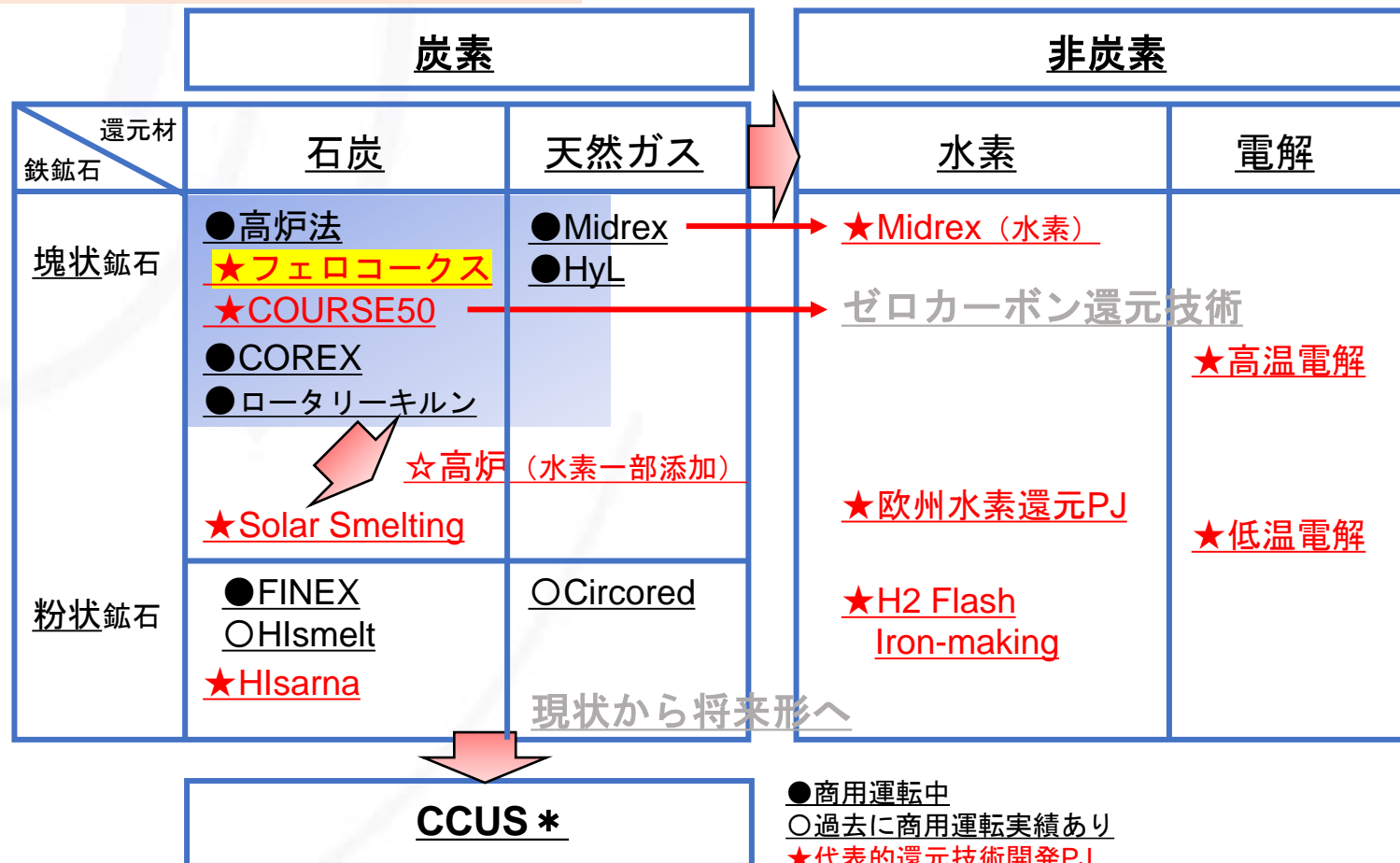
波及効果

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。

国内外の研究開発の動向と比較

鉄鉱石の主な還元プロセス



●商用運転中
 ○過去に商用運転実績あり
 ★代表的還元技術開発PJ
 * CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage

出典：NEDO 2018年度~2019年度成果報告書 「環境調和型製鉄プロセス技術の開発/ 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報告書」 にて日鉄総研作成

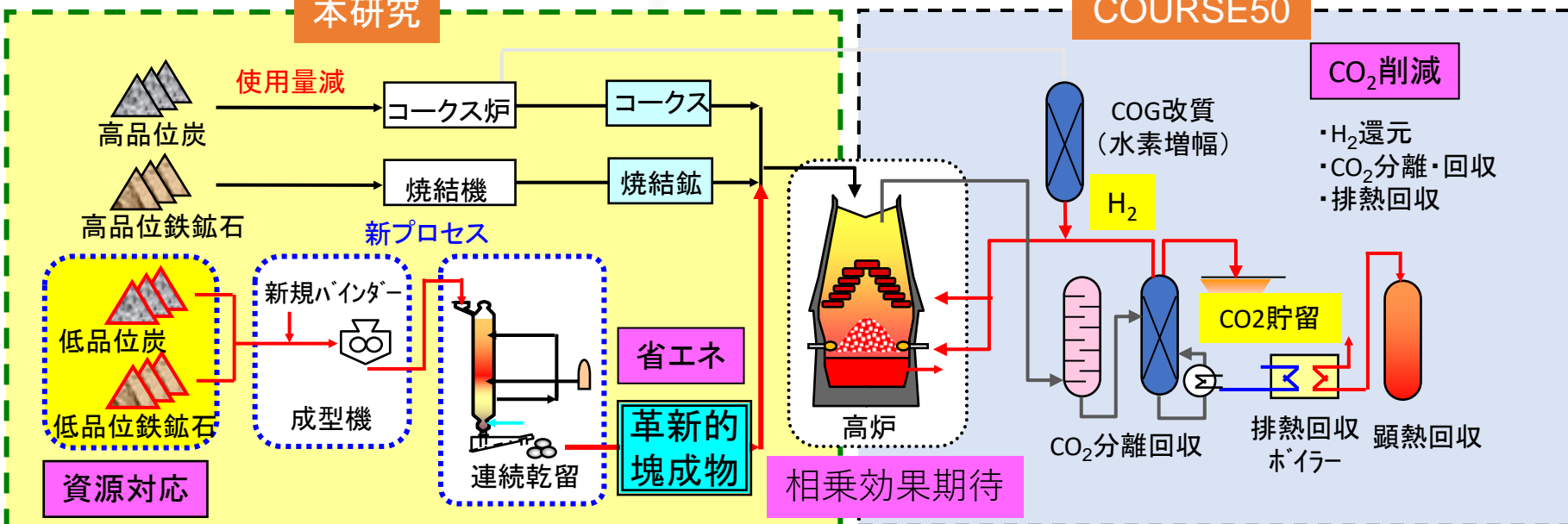
他事業との関係

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

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）

本研究

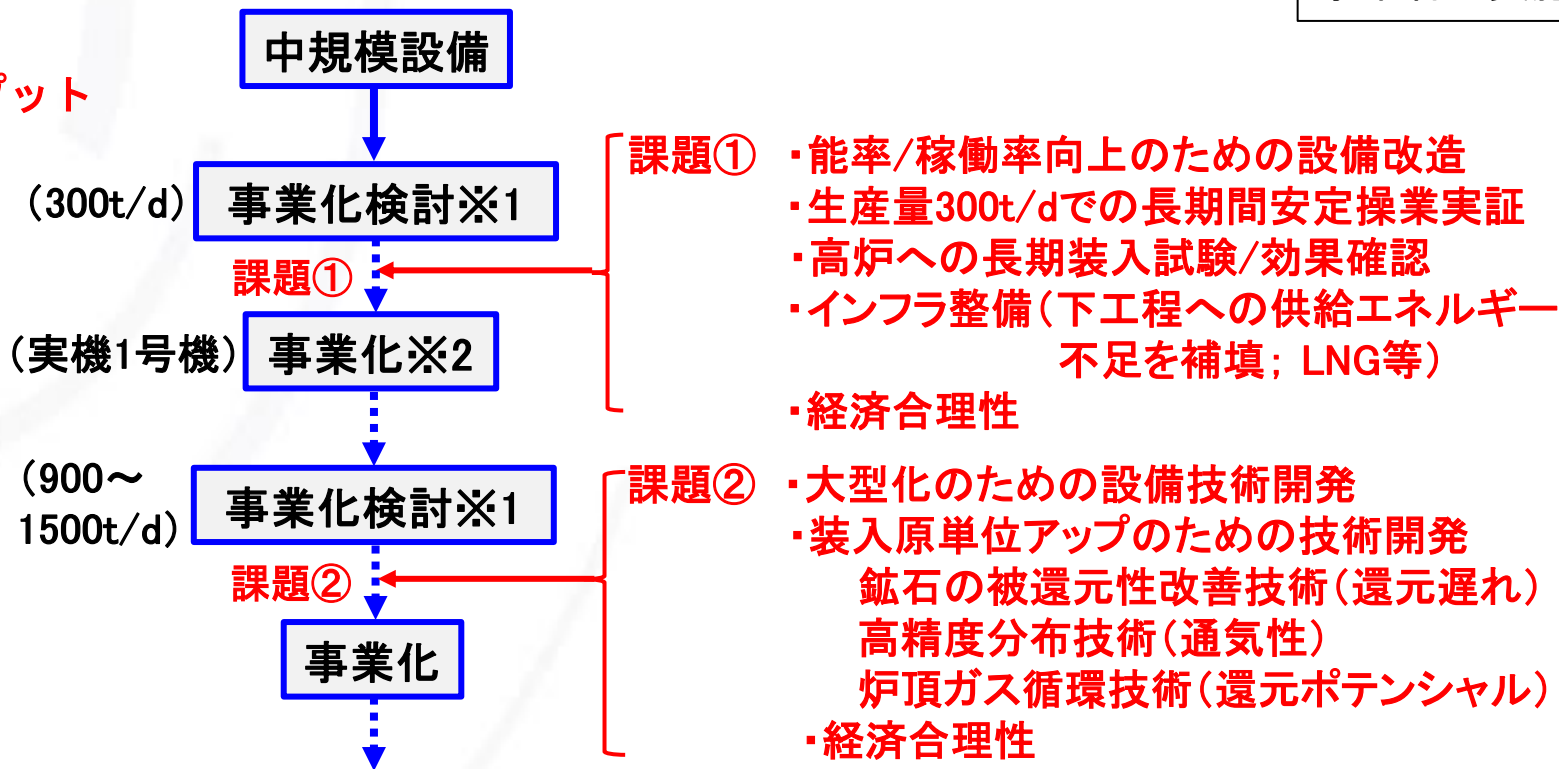
COURSE50



アウトカム（社会実装）達成までの道筋

事業者で実施

2023年
アウトプット



2030年
アウトカム

2030年頃までに業界として5基導入を目指す
CO2削減効果: 82万t-CO2/年
省エネルギー効果: 9.4万kL/年(原油換算)

※1 省エネ・CO2削減効果、設備・インフラ、**経済性**等の評価

※2 中規模設備(300t/d)で実用性が認められれば、研究開発補助金制度に則り**転用**、そのまま事業化(2024年以降)

知的財産・標準化戦略

オープン／クローズ戦略の考え方

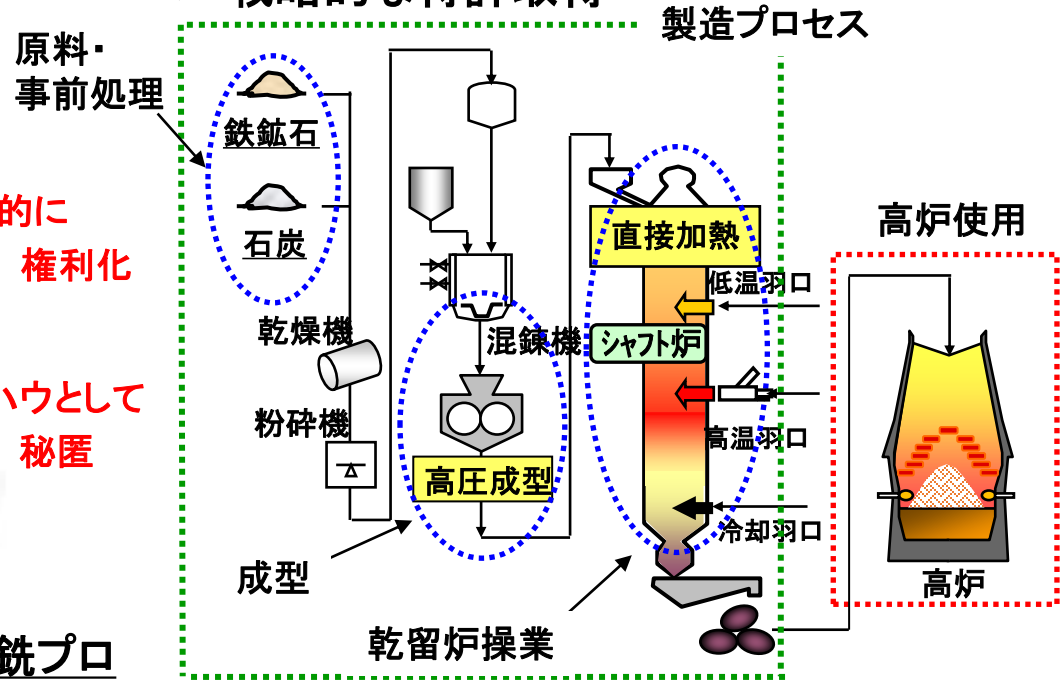
	非競争域	競争域	
公開	品質評価方法	製造技術 使用技術	積極的に 権利化
非公開		操業(運転)技術	

標準化を推進

現PJの前進である先導研究(「革新的製鉄プロセスの先導的研究」)('06~'08年度)開始前に各社が所有する関連技術を封印。「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、特許網構築済み(権利化するもの、ノウハウとして秘匿するものを分類・整理)。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

戦略的な特許取得



基本特許:

- ① 製造方法: プロセス、設備、配合条件
- ② 使用方法: 高炉での装入方法

周辺特許:

- ① 周辺システム、品質制御、副生物処理など

知的財産管理

➤ 知的財産管理指針の策定

1) 成果に係る知的財産権の取扱い

- ・受託会社に帰属（日本版バイ・ドール法に拠る）
- ・共同受託会社間には実施許諾を前提で協議

2) 共同受託会社の既得技術の取扱い

- ・既出願特許：必要のあるものは**実施許諾**を前提で協議
- ・未出願特許：封印技術により既得技術であることを証明
必要のあるものは**実施許諾**を前提で協議

3) 再委託先（大学）での成果に係る知的財産権

- ・国プロの主旨に鑑みて、再委託者、再受託者間で共有すべく協議

➤ 発明委員会（知財会議と称す）の運用

- ・各社知的財産管理部署のメンバーから構成
- ・公表、特許出願案件について審議・認定
- ・各社において、共同開発事業契約（見直し、更新）手続き実行
- ・PJ期間中、年3回程度の頻度で開催

＜評価項目2＞目標及び達成状況

- (1)アウトカム目標及び達成見込み
- (2)アウトプット目標及び達成状況

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
 (1)アウトカム(社会実装)達成までの道筋
 (2)知的財産・標準化戦略



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標と達成見込み
 (2)アウトプット目標と達成状況



3. マネジメント

(1)実施体制
 (※)受益者負担の考え方
 (2)研究開発計画



事業の性質や状況に応じて記載

2. 目標及び達成状況 (詳細) ※

(1)アウトカム目標と達成見込み
 (2)アウトプット目標と達成状況

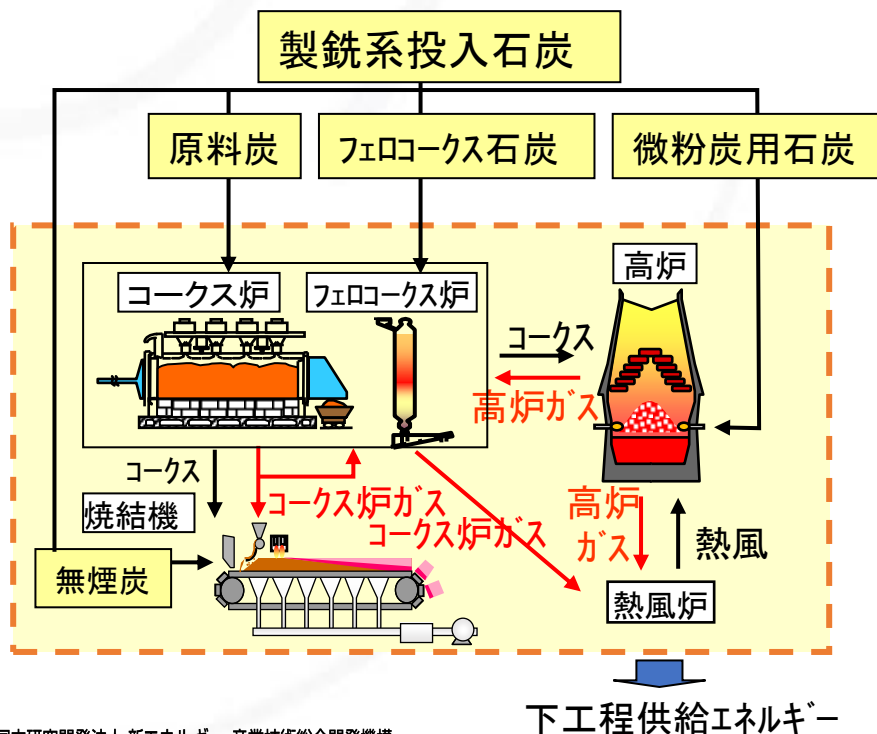
- アウトカム目標の設定及び根拠
- 波及効果
- 本事業における「実用化・事業化」の考え方及び見込み
- 費用対効果
- アウトプット(研究開発成果)のイメージ
- アウトプット目標の設定及び根拠
- アウトプット目標の達成状況
- 研究開発成果の意義
- 副次的成果及び波及効果
- 特許出願及び論文発表

□ (塗りつぶしなし) 評価対象外

(※) 評価対象外
 事前・中間評価時の資料ページは残す

アウトカム目標の設定及び根拠

アウトカム目標	根拠
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。	1, 短期の高炉への投入試験結果により、3分の1の投入石炭をフェロコークスに置き換えた場合、製銑工程における省エネルギー効果10%、CO2削減9.5%を見込まれる。 2, 2030年までに国内25%(高炉5基に相当)普及を見込む。
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。	1, 高品位原料炭削減(63%→39%) 2, 石炭使用量削減(10%)



【前提】

- ◆ 実機1500t/d×5基で製造したフェロコークスを400万t/年規模の高炉5基に装入
 - ◆ 高品位原料炭削減(63→39%)
 - ◆ 石炭使用量削減(10%)
- ↓
- 経済性280億円/年(※)

※原料炭と一般炭の単価(11-15年の通関統計平均値):それぞれ14.0千円/t、10.4千円/tを用いて計算

本事業における「実用化・事業化」の考え方

実用化とは

中規模設備でフェロコークス300t/dの製造技術(混練、成型、乾留、粘結材の各技術)を確立し、フェロコークスが高炉へ連続装入して使用が可能なこと、及び製鉄プロセスの省エネルギーを実現すること。

事業化とは

上記設備で構成された商用規模設備を製鉄プロセスへ導入し、製鉄プロセスで工程化されること。

【具体的取り組み】

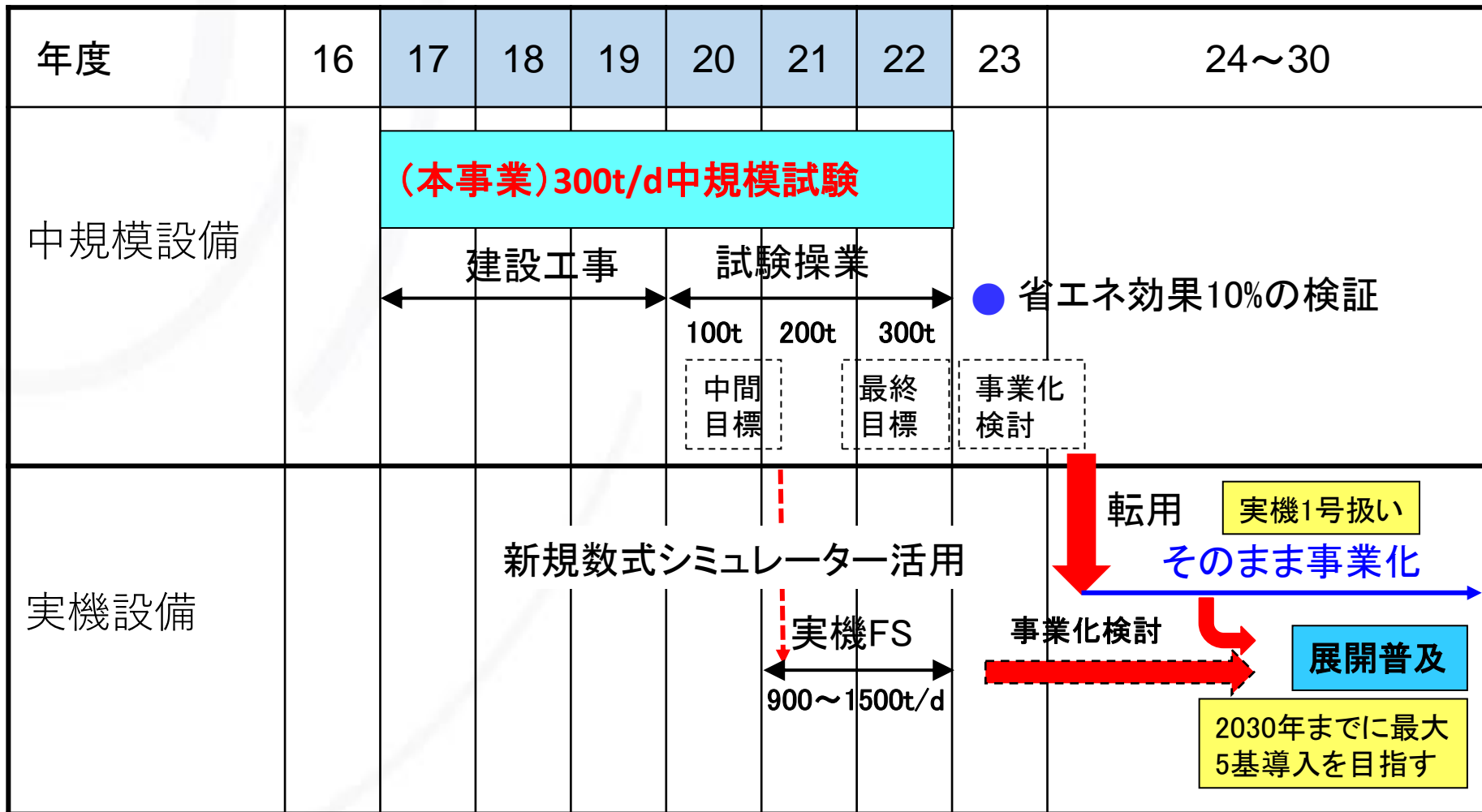
1) 実用化: 中規模設備(300t/d)による工業化課題の克服

- ・高炉での連続使用、設備の安定操業技術・耐久性実証
- ・省エネ効果の精度アップ(大規模設備～1500t/d)でのシミュレーションによる推定含)

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、本中規模設備を商業1号機として事業化を目指す(2024年以降)
- ・展開・普及: 2030年までに業界として実機(900～1500t/d規模)の最大5基導入を目指す(但し、フェロコークス導入によって、経済合理性が確保されること、製鉄工程から発生するエネルギーが減少するため、それを補填する付帯インフラ(LNG供給等)の整備が前提)。

本事業における「実用化・事業化」の考え方



● : 基本技術確立

アウトカム(社会実装)目標の達成見込み

【事業化の条件】

・中規模設備の残課題

能率/稼働率向上のための設備改造
生産量300t/dでの長期間安定操業実証
高炉への長期装入試験/効果確認

・大型化のための設備技術開発、装入原単位アップのための技術開発

・環境整備

インフラ整備(下工程への供給エネルギー不足を補填; LNG等)

・経済合理性



上記課題の解決により、アウトカム目標を達成

波及効果

1. 本PJ(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)は省エネルギーを図りながら、同時にCO₂削減も両立できる技術である。
2. 長期的には高炉ガス(Bガス)からCO₂を分離し、それを地中に埋める、または水素等と反応させて化学品などに変換して再利用するCCUS*技術と組み合わせることにより、さらにCO₂排出量削減を図ることができる。*: Carbon Capture, Utilization and Storage
3. フェロコークス使用による高炉還元材比低下に伴い、製鉄所で使用する石炭量そのものを減らせると同時に、賦存量の限られる原料炭の使用量も減らせることができるため、エネルギーの安定供給(エネルギー安全保障)の観点から有用である。
4. これらの技術開発を加速的に実施、早期実用化を図ることで、国際競争力の維持・強化にも寄与する。

費用対効果

➤ プロジェクト費用の総額

技術開発費総額 192億円

(NEDO助成額＋事業者負担)

NEDO助成額 96.1億円

助成率 1/2

➤ アウトカム 2030年頃までに5基導入を想定

CO₂削減効果 82万t-CO₂/年

省エネルギー効果 19.4万kL/年 (原油換算)

経済性 約280億円

アウトプット目標の設定及び根拠（前身事業等）

前身事業や先導研究等	取組の成果とその評価
<p>エネルギー使用合理化技術開発/エネルギー利用基盤技術先導研究開発/革新的製鉄プロセスの先導的研究('06～'08年度 NEDO)</p>	<p>本研究においてフェロコークスプロセスに関する要素技術の開発を実施。炭材、鉍石の反応速度の定量化による熱保存帯温度低下メカニズムの検証し、BIS炉を用いた炭材の反応開始温度と熱保存帯温度の関係を定量評価。マクロ反応モデルの構築とトータルモデルへの組み込みによるフェロコークス効果の評価を行い、現PJの汎用高機能高炉シミュレーターの開発に至った。さらに、プロセスイメージの構築を実施し、次ステップとなる30t/d規模パイロットプラントの建設へ繋がった。</p>
<p>エネルギーイノベーションプログラム/資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発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年度 国直轄)</p>	<p>本研究において実験室規模での小型成型機、電気抵抗加熱乾留炉を用いた製造試験を行い、成型、乾留一貫操業技術を確立。この研究成果を基に直接加熱方式による30t/d連続縦型乾留炉の設計・建設(複数羽口へのガス温度・流量などの制御技術を基本とする循環ガス加熱システムを構築)を実施。品質向上を目指すため炉頂、各羽口の循環ガス量、温度などの最適操業条件を確立。開発終了後、設備の一部の解体調査(混練機の攪拌羽根、成型機のロール、乾留炉耐火物、製品排出装置など)を実施し、設備劣化を定量的に評価、さらに、離散要素法モデルを活用し、スケールアップ検討を行い、次ステップのスケールアップ指針を得た。</p>

国内外の研究開発の動向と比較

年度	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24~30
技術戦略分類	革新的製鉄先導研究			革新的製鉄プロセス技術の開発				評価事前検討					(今回)中規模試験評価					事業者追加評価	実証普及
																		展開	2030年までに最大で5基導入を目指す★

2006～2008年度 革新的製鉄プロセスの先導的研究 (NEDO)

- ✓ フェロコークスの実験室レベルにおける要素技術の開発
- ✓ フェロコークスによる還元材比低減原理の構築

2009～2012年度 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術の開発 (NEDO, METI)

- ✓ フェロコークス製造能力30t/dのパイロットプラントを建設 (JFEスチール東日本製鉄所、京浜地区)
- ✓ フェロコークスの製造プロセスの実証
- ✓ 高炉(千葉6号機)への短期装入試験を行い、還元材比の削減効果を確認

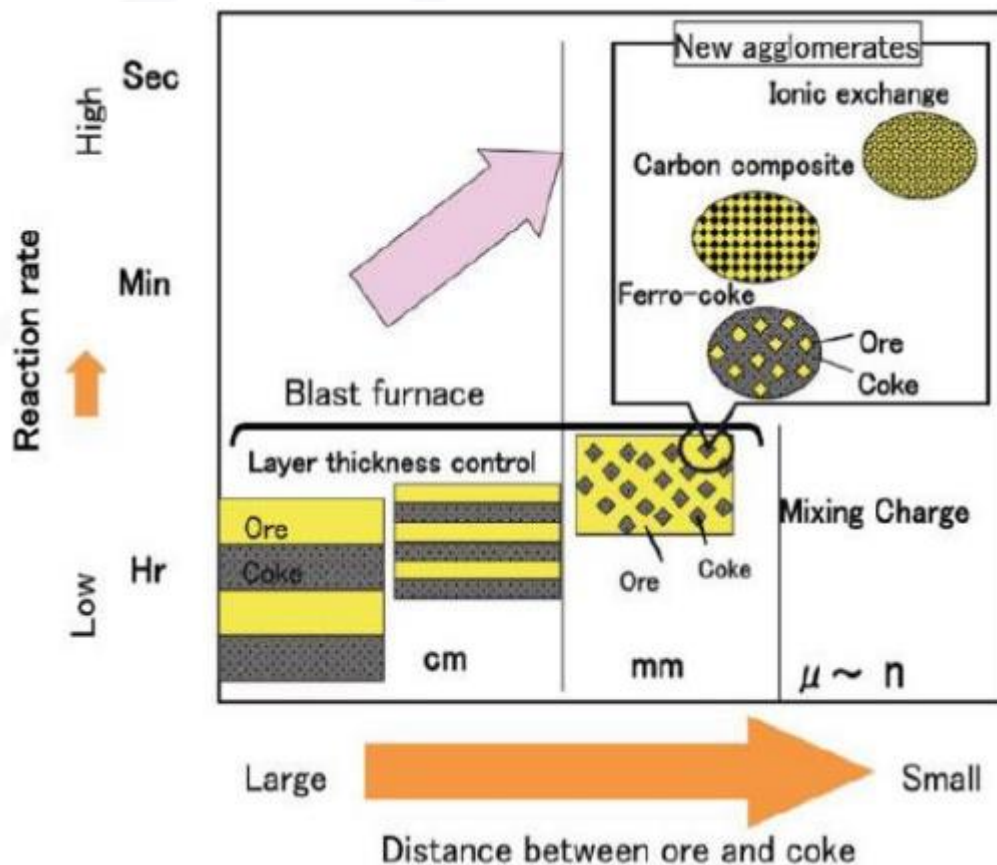
2017～2022年度 環境調和型プロセス技術の開発/フェロコークス技術の開発 (NEDO)

- ✓ 300t/dの中規模設備におけるフェロコークス製造実証(課題抽出含む)と高炉への長期装入試験
- ✓ 安価原料(鉄鉱石、石炭)の使用拡大
- ✓ 高炉操業結果と汎用高機能高炉内反応シミュレーターに基づき製鉄工程における省エネルギー効果10%を検証

国内外の研究開発の動向と比較

2006～2008年度 革新的製鉄プロセスの先導的研究

✓ フェロコークスの還元材比低減原理の構築



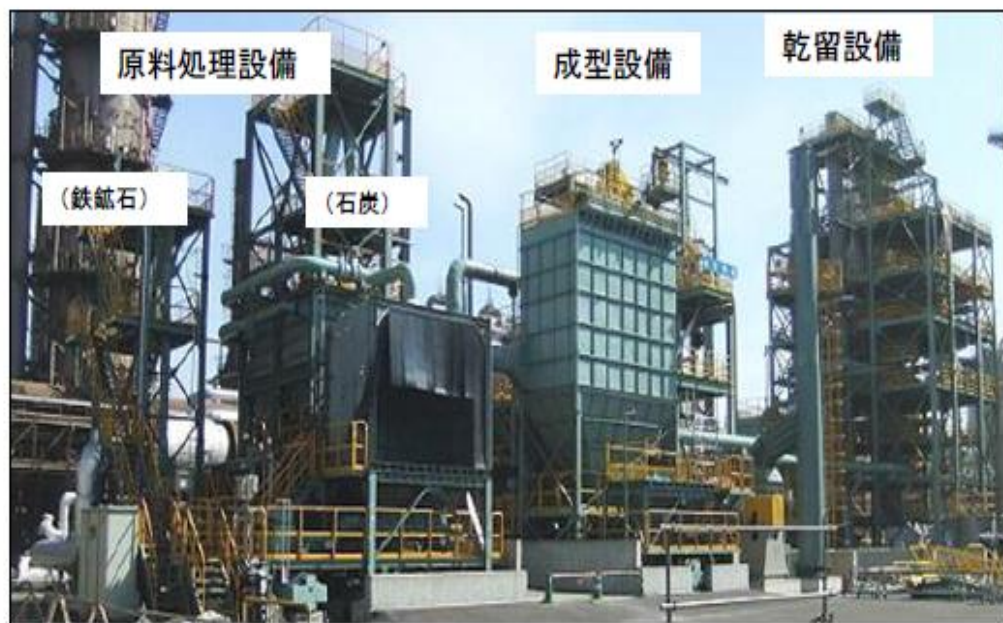
コークス内に金属鉄を適正に
内在させることで金属鉄とコーク
スをより接近させ、コークスとし
ての反応性を高めた技術

出典：NEDO 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る技術開発動向等の調査」

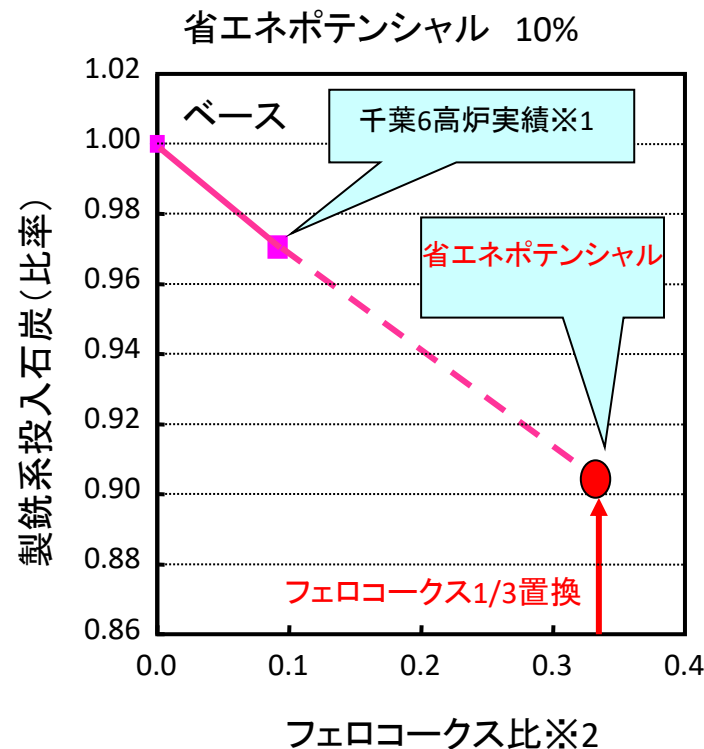
国内外の研究開発の動向と比較

2009～2012年度 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術の開発

フェロコークスの製造プロセス実証



30t/dパイロットプラント全景



※1 NEDO(H21-24)プロジェクト

※2 フェロコークス中のコークス比/高炉全体の
コークス比(-)

出典: 経済産業省 製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室

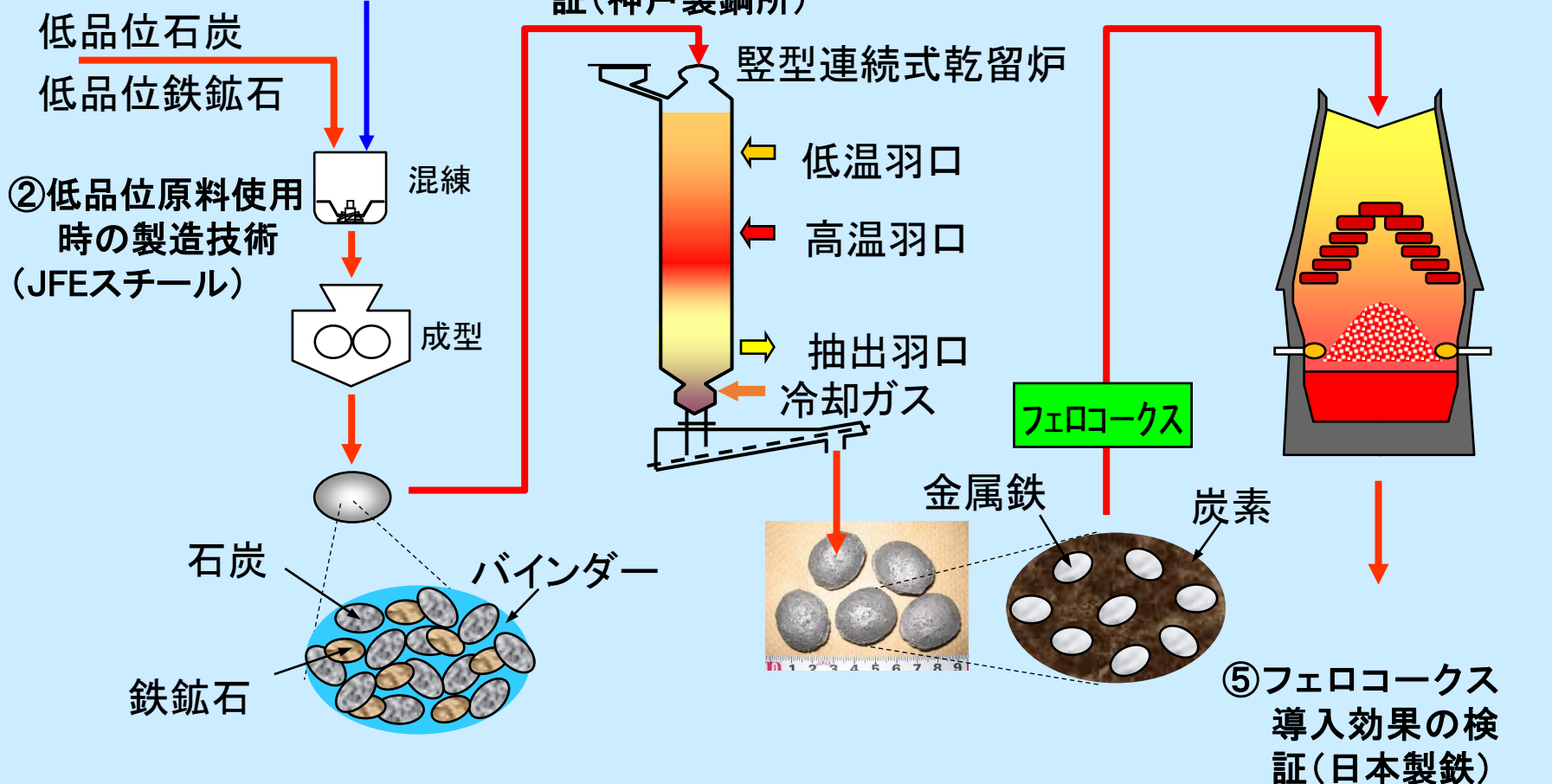
資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発 プロジェクト概要

アウトプット(研究開発成果)のイメージ

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)

新規バインダー ④新バインダー強度発現実証(神戸製鋼所)

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)



アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

研究開発項目：フェロコクス中規模設備での製造実証

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

最終目標(2022年度)

- ・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。

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

目標設定の根拠

- **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。

混合度:混合物の均質化の程度を表す指標。混合物全体から無作為に採取したサンプル中の着目成分の組成の標準偏差を用いて求める。
DI150/15 ドラム強度:JISK2151で規定される試験方法。

アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

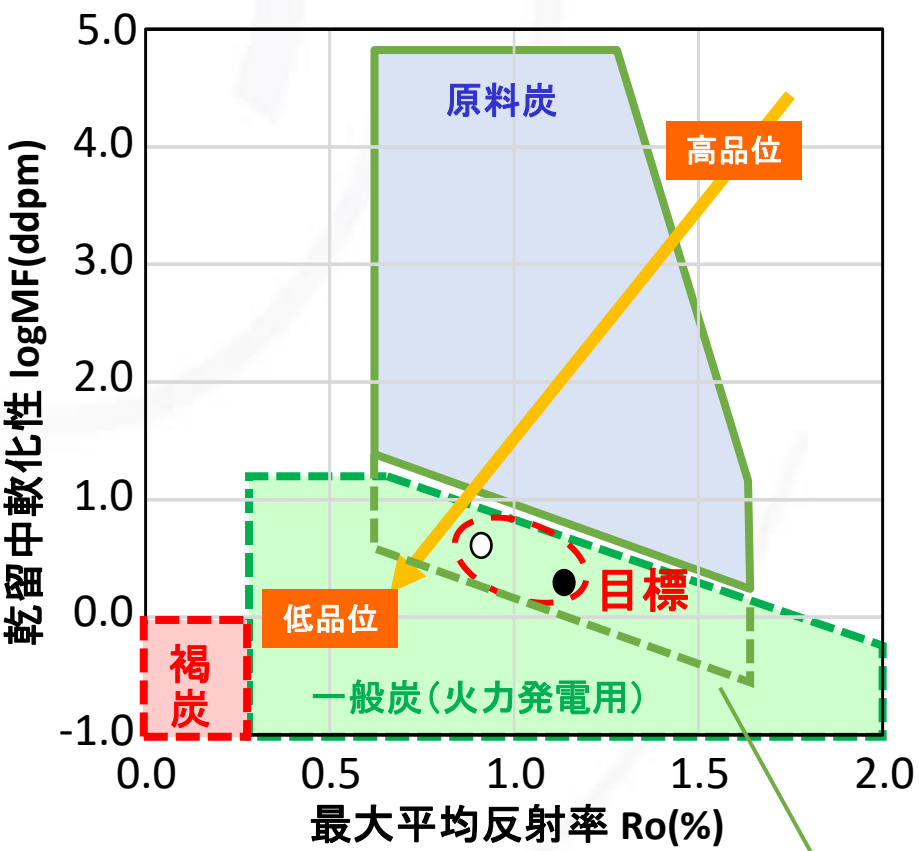
研究開発項目：一般炭、低品位原料使用時の製造技術

最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<p>・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>	<p>➤ 設定理由(成型物の強度(I型ドラム強度): ID30/15\geq85): 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。</p> <p>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。</p>
<p>指標：成型物の強度(I型ドラム強度): ID30/15\geq85</p>	<p>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)</p>

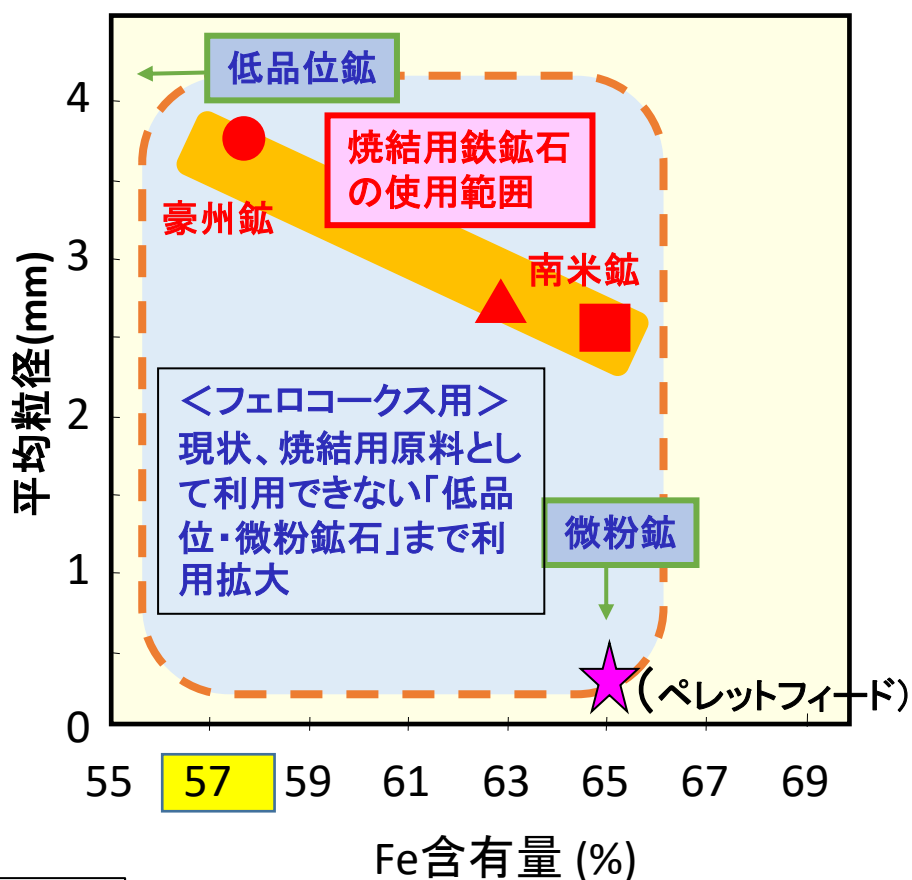
アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

【フェロコークス用 使用石炭品位の目標】

【フェロコークス用 鉄鉱石品位の目標】



現状製鉄業で使用できない「一般炭」領域へと拡大



ピソライト(結晶水多い)

アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

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

最終目標(2022年度)

・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、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。

指標：連続操業試験：30日以上

目標設定の根拠

- **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):**
 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(2022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。

アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

研究開発項目：新バインダー強度発現実証

最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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新規液体バインダーの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。工業的に低負荷となるフェロコークスの圧縮成型条件の提案。 	<p>➤ 設定理由:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークス普及時には、従来のASP(石油精製副産物)、SOP(コークス炉副産物)では量的に不足が想定されるため、代替バインダーの開発を実施。成型物およびフェロコークス強度は、製造プロセスおよび高炉安定操業を担保するための強度値として設定(室炉コークスを基準に設定) ・フェロコークス炉で副生されるタール(フェロコークスタール)の液体バインダー適用による供給安定化とコスト削減を実現するため。 ・将来の劣質原料を利用したフェロコークス成型物の汎用的な製造指標を得るため。
<p>指標: 成型物の強度(I型ドラム強度): $ID30/15 \geq 85$ 乾留後塊成物の強度(ドラム強度): $DI150/15 \geq 80$ 冷間強度予測モデル解析結果の誤差: 10%以内</p>	<p>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。 DI150/15(ドラム強度) JISK2151で規定される強度試験方法。</p>

アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

研究開発項目：フェロコークス導入効果の検証

最終目標(2022年度)

- ・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。
- ・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(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。

目標設定の根拠

- **設定理由(2022年度):**
フェロコークスの高炉使用時の効果検証において、⑤-2で得られた知見を反映した⑤-1のシミュレーションモデルを用いて福山3高炉操業解析を行い、モデルの精度を確認するとともに、製鉄所トータルでの評価を実施することで本プロジェクトの目標が達成できるものと設定。
- **設定理由(2022年度):**
省エネ10%という値は、本プロジェクトにおける最終目標値であることから、この値を目標指標として設定。

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目：①フェロコークス中規模設備での製造実証

①-1 中規模設備の開発

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

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

①-2 固液均一混合のシミュレーション

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<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確認する。 ・生産量300t/dで長期間安定稼働が可能なことを実証する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用いた混錬時間と強度の関係から中規模設備での混錬条件を設定。 ・降雨・設備トラブルのため生産量100t/dでの操業試験実施。 	○ ×	<ul style="list-style-type: none"> ・混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。 ・短期間での150t/d操業を実現。原料の棚吊り、居着き等で長期間操業は100t/dに留まる。能率/稼働率の改善が必要。
<ul style="list-style-type: none"> ・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"> ・石炭2銘柄配合、鉱石20%配合によりDI150/15\geq80を達成。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭配合、鉱石比率の最適化により高炉装入に耐え得る強度確保。
<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>ラボスケールで混錬時間と混合度の関係を検証。実機規模の混合・攪拌シミュレーションプロトタイプを完成。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。
<p>指標2:乾留後塊成物のドラム強度:DI150/15\geq80</p>	<p>DI150/15 ドラム強度DI150/15\geq80を達成。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭配合、鉱石比率の最適化により高炉装入に耐え得る強度確保。

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目：②一般炭,低品位原料使用時の製造技術

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<p>・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>	<p>・ラボスケールにおける原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みを行い、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した。</p> <p>・戻り粉、フェロタルのリサイクルは未実施。</p>	<p>○</p> <p>×</p>	<p>・ラボスケールにおける原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みを行い、一般炭4銘柄、PC炭3銘柄、鉄石2銘柄が適用可能なことを検証し、達成と評価。更に、これら原料を中規模設備において使用試験を実施し、フェロコークス目標強度DI150/15\geq80を達成。</p> <p>・戻り粉、フェロタル使用により成型物の歩留り低下。歩留り向上が課題。</p>
<p>指標:成型物の強度(I型ドラム強度):ID30/15\geq85</p>	<p>中規模設備で製造した成型物の強度ID30/15\geq90を達成。</p>	<p>○</p>	<p>ラボスケールでの混合度試験結果と合致した東北大学の混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。</p>

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目：③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<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。</p> <p>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%を検証する。</p>	<p>・高炉装入試験のため、フェロコークス約2000～3000tの作り溜めを行い、装入原単位30kg/tの高炉装入試験約2週間を2回実施。</p> <p>・フェロコークス多量使用時のFS検討を実施し、高炉工程における還元材比11%の削減、製鉄工程の省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減の全てを達成できる可能性があることを見出した。</p>	<p>△</p> <p>○</p>	<p>・フェロコークス装入原単位30kg/tを計画通り実施。1回目の高炉装入試験では期待値通りのRARの低減を達成。2回目の試験では、通気性悪化により連続操業は約2週間に留まったが、操業上の課題が明らかとなった。通気性改善のための高精度分布技術の開発が必要。</p> <p>・多量装入時に課題となる鉱石の還元速度低下に対し、様々な対策技術(被還元性アップ、装入物分布適正化、炉頂ガス循環等)を導入することで、省エネ11%達成を見込める。</p>
<p>指標：連続操業試験：30日以上</p>	<p>高炉装入試験、連続操業約2週間。</p>	<p>×</p>	<p>フェロコークスの作り溜めによる高炉での連続使用。</p>

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目：④新バインダー強度発現実証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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新規液体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。工業的に低負荷となるフェロコークスの圧縮成型条件の提案。 	<ul style="list-style-type: none"> ・新規固形バインダーを用いて製造した成型物とフェロコークスにおいて目標強度値を達成し、且つASP以上の強度向上効果を有することを確認。社会実装へのスケジュール案と実証プラントの概念設計案を提示した。 ・フェロコークスタールを原料に蒸留分画し、成型温度域での粘度をSOPと同等に調整することで好適な液体バインダーが調製できることを明らかにした。製造プロセス案として、フェロコークス炉のタール処理工程に付設する減圧フラッシュ蒸留ユニットの概念を提示した。 ・離散要素法に基づく数値解析より、石炭+バインダー+鉄鉱石の混合系からなる成型物の冷間強度を表現できるモデルを提案した(解析誤差:10%以内)。 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ ○ ○ 	<p>ASP以上の強度向上効果を有するバインダーを開発したこと。また社会実装可能なプロセスを提示したこと。</p> <p>液体バインダーに必要な機能(粒子潤滑性の付与と粒子間の接着力)の代表指標として、成型温度域の粘度が活用できる事を明らかにし、社会実装可能なプロセスを提示したこと。</p> <p>開発したモデルから、ブリケット成型時のダブルロールの二軸間の線圧の最適化(動力、生産効率の最適化)に活用が可能であること。</p>
<p>指標:成型物の強度(I型ドラム強度):ID30/15\geq85 乾留後塊成物の強度(ドラム強度):DI150/15\geq80</p>			

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目：⑤フェロコークス導入効果の検証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<p>・評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認。</p> <p>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。</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>・福山3高炉の操業実績を解析し、フェロコークス30kg/t装入時の操業諸元変化を高炉数学モデルの精度検証を実施。</p> <p>・フェロコークス多量使用時のFS検討を実施し、高炉工程における還元材比11%の削減、製鉄工程の省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減の全てを達成できる可能性があることを見出した。</p> <p>・一般炭、低品位原料を用いて中規模製造設備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た。</p>	○	<p>・福山3高炉の操業実績をシミュレーションモデルが精度よく再現できており、解析精度は十分と判断。</p> <p>・フェロコークス多量使用時の課題となる鉱石還元速度の低下に対して種々の対策を実施することで省エネ目標を達成できることを確認。</p> <p>・定式化したフェロコークス反応速度の知見を福山3高炉の操業解析でそのまま使用し、操業実績を精度よく表現していることを確認。</p>
<p>指標： 製鉄工程省エネ10%減</p>	<p>・還元材比11%の削減、製鉄工程省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減。</p>	○	<p>・数値シミュレーション(⑤-1)と製鉄所トータル評価(③)によるFS検討結果より判断。</p>

研究開発成果の意義(副次的成果)

- ・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。

特許出願及び論文発表

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	計
論文	0	0	3	2	3	2	10
研究発表・講演	0	3	9	2	4	3	21
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	13	2	0	15
展示会への出展	1	1	1	0	0	1	4
特許(内外国出願)	0	0	0	1(0)	0	3(0)	4(0)

論文

○JFE技報、2022年4月掲載 「フェロコークスの製造および高炉使用」 など

口頭発表

○2021年12月、CUUTE-1 (The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment)「Development of ferro coke process through national projects」 など

特許

○海外特許出願について: 今後、国内ではCNに向けて石炭利用が厳しくなるため、本技術は海外展開(特にインド)が想定されるが、海外出願をするとオープン情報になってしまうため、あえて海外出願をしない方針とした(ノウハウ、クローズ情報)。

＜評価項目3＞マネジメント

(1) 実施体制

(※) 受益者負担の考え方 * 終了時評価においては対象外

(2) 研究開発計画

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
 (1)アウトカム(社会実装)達成までの道筋
 (2)知的財産・標準化戦略



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標と達成見込み
 (2)アウトプット目標と達成状況



3. マネジメント

(1)実施体制
 (※)受益者負担の考え方
 (2)研究開発計画



事業の性質や状況に応じて記載

2. 目標及び達成状況 (詳細) ※

(1)アウトカム目標と達成見込み
 (2)アウトプット目標と達成状況

(※) 評価対象外
 事前・中間評価時の資料ページは残す

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 予算及び受益者負担
- アウトプット(研究開発成果)のイメージ(再掲)
- 目標達成に必要な要素技術
- 研究開発のスケジュール
- 進捗管理
- 進捗管理: 中間評価結果への対応
- 進捗管理: 動向・情勢変化への対応
- 進捗管理: 開発促進財源投入実績
- モティベーションを高める仕組み(該当事業のみ)

□ (塗りつぶしなし) 評価対象外

NEDOが実施する意義

日本の鉄鋼業

- 省エネルギー: 世界最高効率の省エネルギー技術の導入
- CO₂削減: 鉄鋼業は製造業の排出するCO₂の約40%
鉄鋼業の内、高炉から排出されるCO₂は約70%を占め、削減が急務

更なる省エネルギー、CO₂削減を目指す ⇒
革新的な製鉄プロセス技術の開発

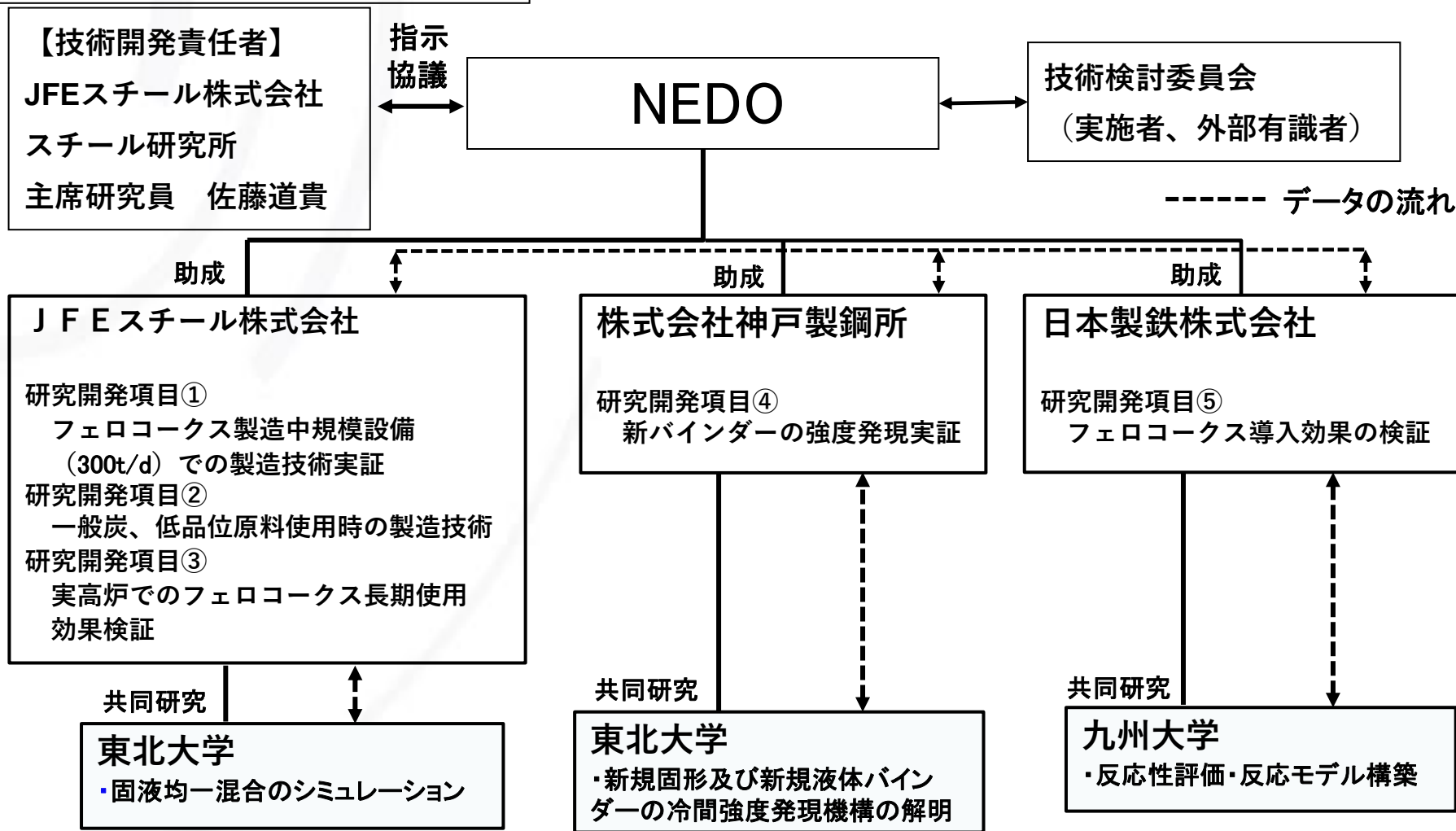


- ✓ 長期間の開発 巨大な投資額 技術開発リスクが大きい
- ✓ 国がイニシアチブを取り 産官学のコンソーシアムを構築する
その中で、国内高炉メーカー、大学等のノウハウを結集する
- ✓ 地球温暖化対策計画でも開発の必要性がうたわれている

NEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

実施体制 (実施者間での連携)

◆ 研究開発の実施体制



個別事業の採択プロセス

【公募】

公募予告(2017年1月27日)⇒公募(2017年2月27日)⇒公募×切(2017年3月28日)

【採択】

採択審査委員会(2017年4月19日)

採択審査項目;NEDOの標準的採択審査項目に以下の審査項目を加えた。

- ・成果の実用化に関して、他社の高炉にも対応した技術が確立できるか。
- ・省エネルギー効果に関して、省エネルギー効果量の算出の考え方が妥当であるか。

採択条件等;採択審査委員会では以下の改善要望があり、事業を実施する中で留意し対応することとなった。

- ・この事業の経済性について具体的に示すこと。
- ・COURSE50との連携において相乗効果(省エネルギー、CO2削減、経済性)の評価方法を明示すること。
- ・ブリケットの反応性と強度について大学と連携し解明すること。
- ・連続乾留炉の排ガス利用について検討すること。
- ・フェロコックス高配合化について、シミュレーションを早期に開始し必要な対策を講じること。
- ・2030年以降の普及計画を示すこと。

予算及び受益者負担

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
調査研究	助成対象事業費	13,438	16,586	24,494	13,460	14,442	16,034	98,454
	補助率50%	6,719	8,293	12,247	6,730	7,221	8,017	49,227
製造技術開発	助成対象事業費	1,636,026	4,080,740	5,047,980	5,384,066	658,642	879,046	17,686,500
	補助率50%	818,013	2,040,370	2,523,990	2,692,033	329,321	439,523	8,843,250
製造運転研究	助成対象事業費	4,420	2,220	6,290	650	755,412	640,796	1,409,788
	補助率50%	2,210	1,110	3,145	325	377,706	320,398	704,894
成果とりまとめ	助成対象事業費	2,548	3,834	3,060	2,048	6,064	5736	23,290
	補助率50%	1,274	1,917	1,530	1,024	3,032	2,868	11,645
合計	助成費用	828,216	2,051,690	2,540,912	2,700,112	717,280	770,806	9,609,016

補助事業の理由

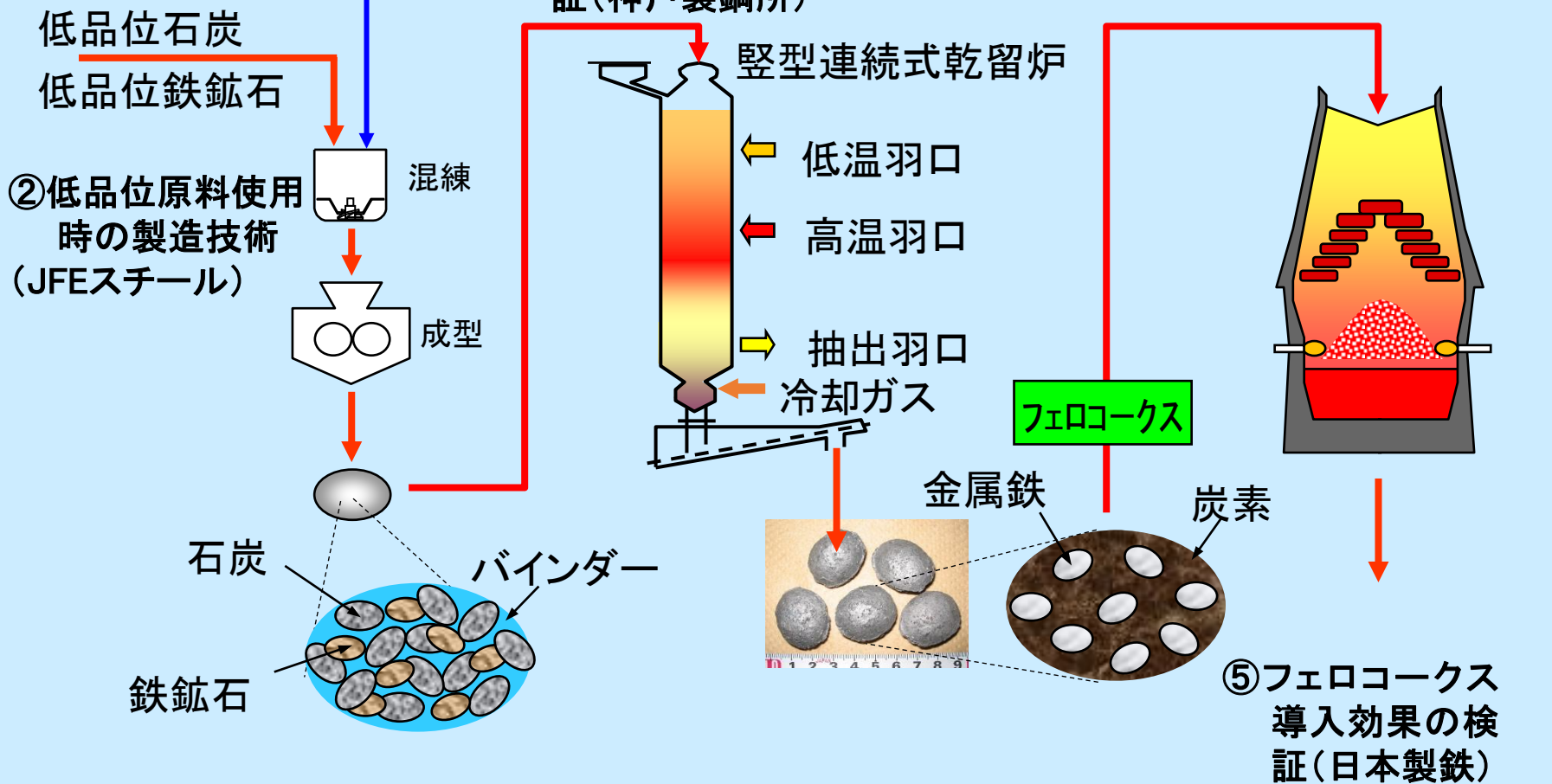
- ✓ 長期間の開発 巨大な投資額 技術開発リスクが大きい
- ✓ 国がイニシアチブを取り 産官学のコンソーシアムを構築する
その中で、国内高炉メーカー、大学等のノウハウを結集する
- ✓ 地球温暖化対策計画でも開発の必要性がうたわれている

目標達成に必要な要素技術

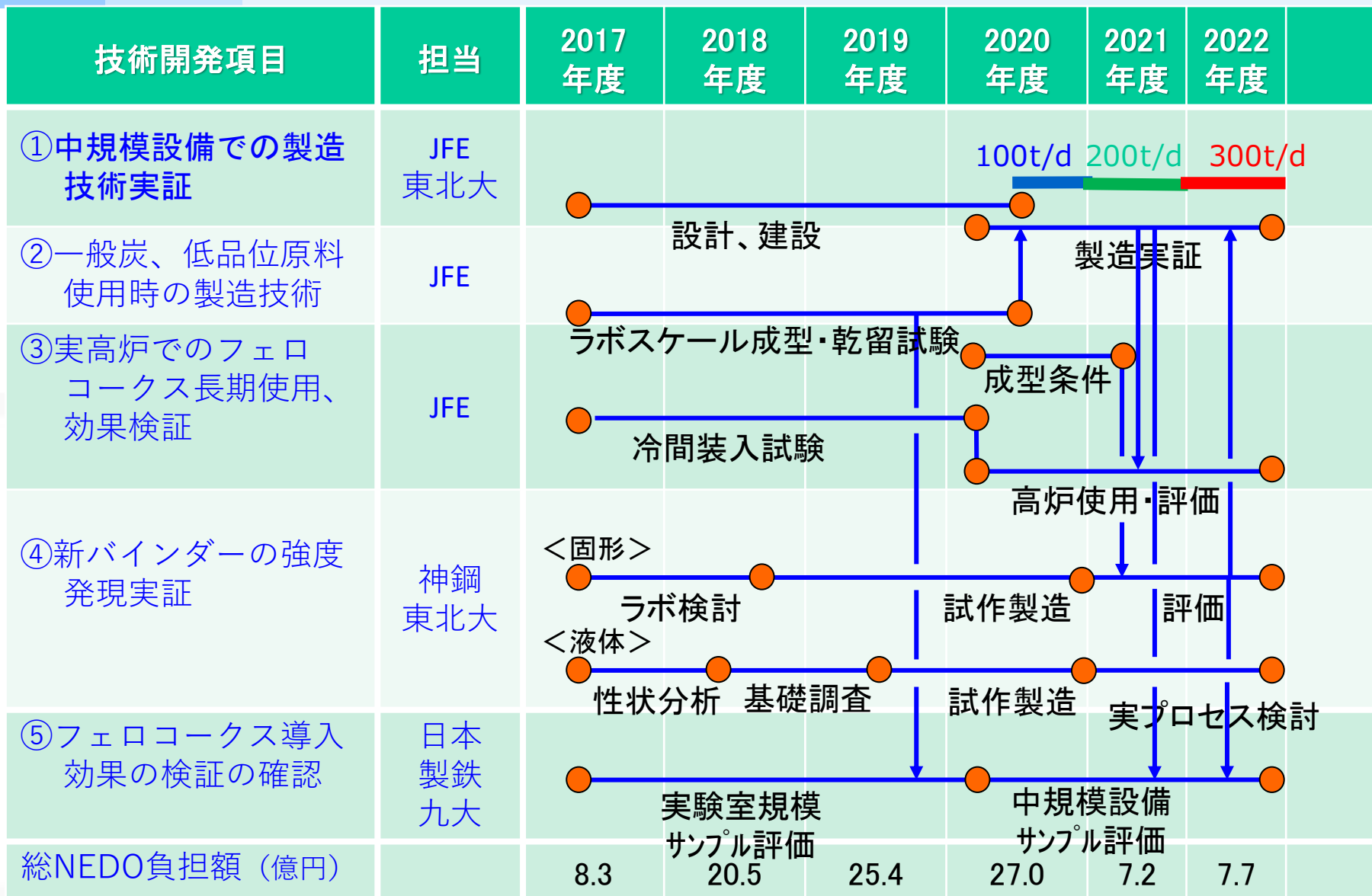
①フェロコークス製造中規模設備(以降「中規模設備」)での製造技術実証(JFEスチール)

新規バインダー ④新バインダー強度発現実証(神戸製鋼所)

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)



研究開発のスケジュール



進捗管理

技術開発責任者(実施者)による進捗管理

- ・年3回程度、事業者主催の幹事会を開催し、進捗状況の確認と今後の実施内容の説明と議論。また同時に知財会議を開催、各種契約、社外発表案件等について管理。
- ・事業者主催の研究会(中間)を開催し、成果の確認・議論。また年度末には成果報告会・アドバイザリーボードを開催し、アドバイザリーボードによるコメントをもらい、以後の研究開発活動に反映

幹事会・知財会議開催実績

2017年度	8月28日	11月06日	3月02日
2018年度	4月16日	10月31日	2月22日
2019年度	6月07日	10月25日	2月21日
2020年度	6月16日	11月11日	2月28日
2021年度	6月17日	10月22日	3月03日
2022年度	6月27日	11月10日	3月03日

進捗管理

技術開発責任者(実施者)による進捗管理

研究会、成果報告会・アドバイザリーボード開催実績

2017年度	8月28日	3月02日
2018年度	4月16日	2月22日
2019年度	6月07日	2月21日
2020年度	6月16日	2月28日
2021年度	6月17日	3月03日
2022年度	6月27日	3月03日

アドバイザリーボード

碓井 建夫	国立大学法人	大阪大学	名誉教授
山本 高郁	国立大学法人	京都大学高等研究院	客員教授

進捗管理

PMによる進捗管理

技術検討委員会開催実績

2017年度	11月16日(NEDO)	3月7日(NEDO)
2018年度	6月26日(日本製鉄 君津) 1月16日(JFEスチール 福山)	11月9日(神戸製鋼所 高砂) 3月12日(NEDO)
2019年度	7月26日(川崎) 3月3日(書面開催)	12月13日(JFEスチール 福山)
2020年度	9月9日(JFEスチール 福山)	3月15日(NEDO)
2021年度	7月19日(NEDO) 3月23日(NEDO)	11月26日(JFEスチール 福山)
2022年度	7月29日(NEDO) 3月1日(NEDO)	12月14日(NEDO)

進捗管理：中間評価結果への対応

	指摘事項	対応
1	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。	2030 年時点における事業化、海外展開に遅れが生じないように技術検討委員会を活用し、研究開発をスケジュールどおりに進める。
2	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。	CO2 削減コスト(炭素価格)については、本事業の外で決定されるものである。今後、炭素価格等の制度改正の検討が予定されているため、それらの結果を踏まえた上で、改めて普及時のインパクトについて評価を行う。
3	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。	技術検討委員会においては開発状況は共有されていたが、さらに常日頃からNEDO を介して開発状況を共有する。特に実施計画の変更に当たっては、変更情報を事業者とNEDO で共有し、関連する要素技術の開発に与える影響を計画変更へ確実に反映させる。
4	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。	技術検討委員会において、外部有識者の意見も踏まえて技術の取捨選択、実施体制の見直しを進める。また、同委員会の中で海外展開に向けた知財検討状況についてより議論を進めていく。事業者とともに海外展開を視野に入れた知的財産戦略の構築を積極的に進める。
5	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。	COURSE50 との相乗効果については、2022 年度において最適解を得るために、双方のプロジェクト間の連携を継続する。さらに、他の国プロの技術開発動向を把握し、各要素技術との組合せによる将来像について、NEDO、事業者とも今後のビジョンを議論し、情報発信や広報活動を積極的に行うように努める。
6	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。	本事業において、省エネルギー効果量の推測のため、当初計画していたフェロコークス装入量30kg/t に追加して45kg/t 以上の水準を実施することで、高炉内高機能反応シミュレーターの予測精度を上げる計画である。データの信頼性が確保できる適切な回数の高炉装入試験を実施する計画である。

進捗管理：中間評価結果への対応

	指摘事項	対応
7	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ため、下工程を考慮した技術開発の検討が望まれる。	本事業において実施予定である高炉内へのフェロコークス装入試験結果より全工程を見据え、下工程への供給エネルギーの精査を行い、技術課題を明確にする。
8	成果は世界初であり、他国でも同様の技術開発が進むことから、国際協力とともに適切な知的財産保護が求められる。	知財戦略については、知財会議(事業者主体で実施)にて議論を行い、さらに、その結果を事業者(知財担当者も含め)より技術検討委員会にて報告、議論を行う。事業者とともに海外展開を視野に入れた知的財産戦略の構築を積極的に進める。
9	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。	乾留炉で生じるフェロコークスタールの活用については、本事業の中で改質による特性向上、設備の安定的な運転条件の探索を行い、生産規模拡大時に適用できる製造条件の確立をする。
10	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。	高炉へのフェロコークス装入試験結果より、その経済性、省エネルギー性、CO2 削減効果を見極め、普及促進に向けた課題とその対応を明確にする。さらに、脱炭素化に向けた本プロジェクトの位置づけや将来像について事業者とともに明らかにし、情報発信や広報活動を積極的に行う。
11	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。	海外展開については2018 年度に実施した調査事業において海外の市場ポテンシャルを明確にしている。状況の変化に応じてさらに必要な調査事業を実施し、結果を事業者と共有することで、海外展開を視野に入れた積極的な事業展開を求める。
12	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。	地球温暖化に関する規制の動向を注視し、開発の加速を検討する。

進捗管理: 動向・情勢変化への対応

【海外技術動向の把握】

本プロジェクトの調査により、省エネルギー、CO₂削減に向けた技術開発動向と事業化に向けた情報を収集し、プロジェクトの位置付けを明確にした。

情勢・動向の把握	対応	成果
フェロコークス、 COURSE50の競合技術 動向の把握及び市場動 向調査による海外展開 のための市場ポテンシャルを把握	「環境調和プロセス技術の開発に係る技術開発動向等の調査」の実施 2017年度～2018年度	競合技術: Hisarna Finex 市場ポテンシャル: ・市場の伸びが大きい⇒ インド ・省エネに対するインセンティブ大 ⇒ インド 中国 ・小型高炉の統廃合が進む ⇒ インド 中国 ・原料炭輸入国(～2040年頃) インド 中国
2050年を目指しCO ₂ 削減 に向けた各国の政策の 動向及び水素還元製鉄 の技術開発動向を整理 する	「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動向調査」 2018年度～2019年度	政策動向: ・2050年を目指したCO ₂ 排出量削減に向けた取組みを確認 ・欧州鉄鋼連盟のロードマップ及び各国(各社)における低炭素製鉄に向けた技術開発の状況を確認 ・高炉集約、電炉増設等の動向把握

進捗管理: 動向・情勢変化への対応

【計画変更 2020年8月】

1. 中規模設備の実用性評価のための精度向上

当初計画では、2022年度にてフェロコークス装入量原単位 30kg/溶銑1tを高炉へ装入することで、高炉内還元材比削減率 通気性の変化 物質・エネルギー収支、操業コストの評価を行う予定であったが、実機装入レベル50kg~150kgにできるだけ近い装入量で、影響を確認する必要性が議論された。

2. コロナ禍による事業の遅れ

コロナ禍により、中規模設備設置後の負荷運転が約2ヶ月遅れたことから、実施内容の見直しを行った。

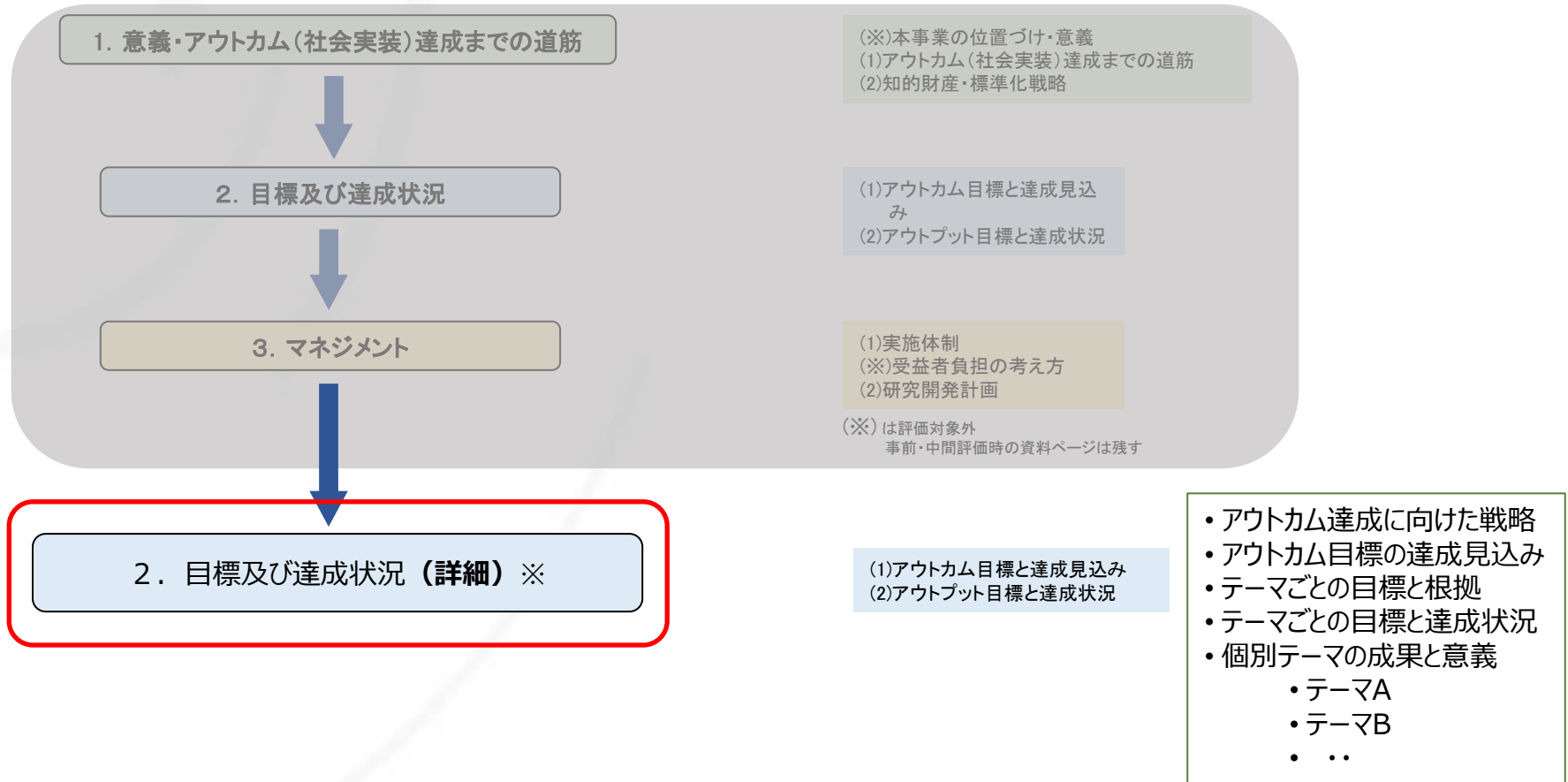
➤ 操業試験期間の短縮に伴う条件の検討

【計画変更 2022年6月】

1. 乾留炉耐火物の劣化調査

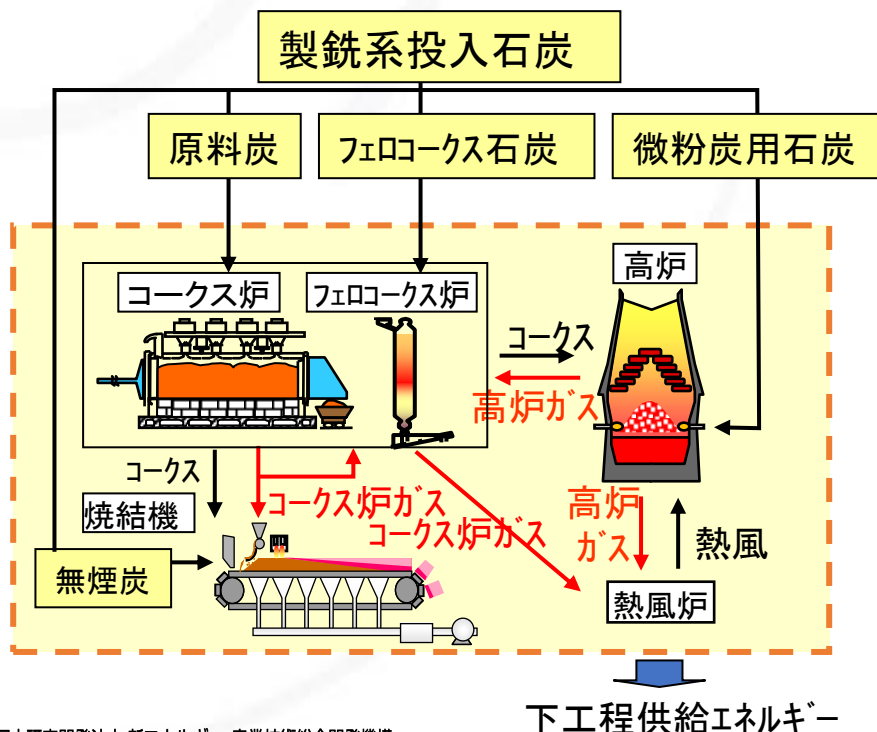
2021年、社内他設備(高炉鍋)の煉瓦にて材質劣化の事例が確認、メーカー解析結果から原因が炭素沈積であることが判明し、中規模設備においても炭素沈積の可能性があると考え、耐火物劣化状況の調査を行った。

報告内容



アウトカム目標の設定及び根拠

アウトカム目標	根拠
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。	1, 短期の高炉への投入試験結果により、3分の1の投入石炭をフェロコークスに置き換えた場合、製銑工程における省エネルギー効果10%、CO2削減9.5%を見込まれる。 2, 2030年までに国内25%(高炉5基に相当)普及を見込む。
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。	1, 高品位原料炭削減(63%→39%) 2, 石炭使用量削減(10%)

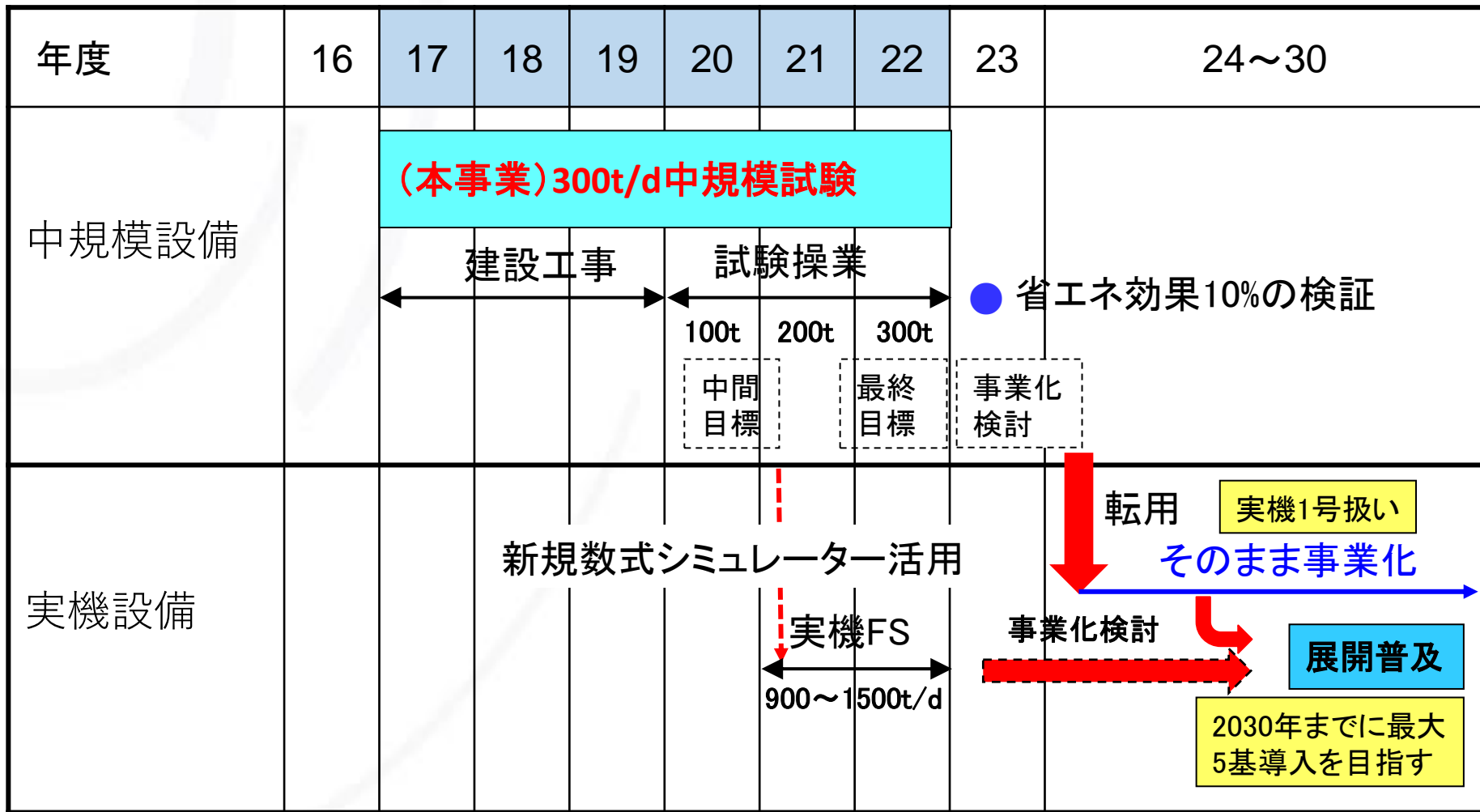


【前提】

- ◆ 実機1500t/d×5基で製造したフェロコークスを400万t/年規模の高炉5基に装入
 - ◆ 高品位原料炭削減(63→39%)
 - ◆ 石炭使用量削減(10%)
- ↓
- 経済性280億円/年(※)

※原料炭と一般炭の単価(11-15年の通関統計平均値):それぞれ14.0千円/t、10.4千円/tを用いて計算

アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組



● : 基本技術確立

アウトカム目標の達成見込み

【事業化の条件】

・中規模設備の残課題

能率/稼働率向上のための設備改造
生産量300t/dでの長期間安定操業実証
高炉への長期装入試験/効果確認

・大型化のための設備技術開発、装入原単位アップのための技術開発

・環境整備

インフラ整備(下工程への供給エネルギー不足を補填; LNG等)

・経済合理性



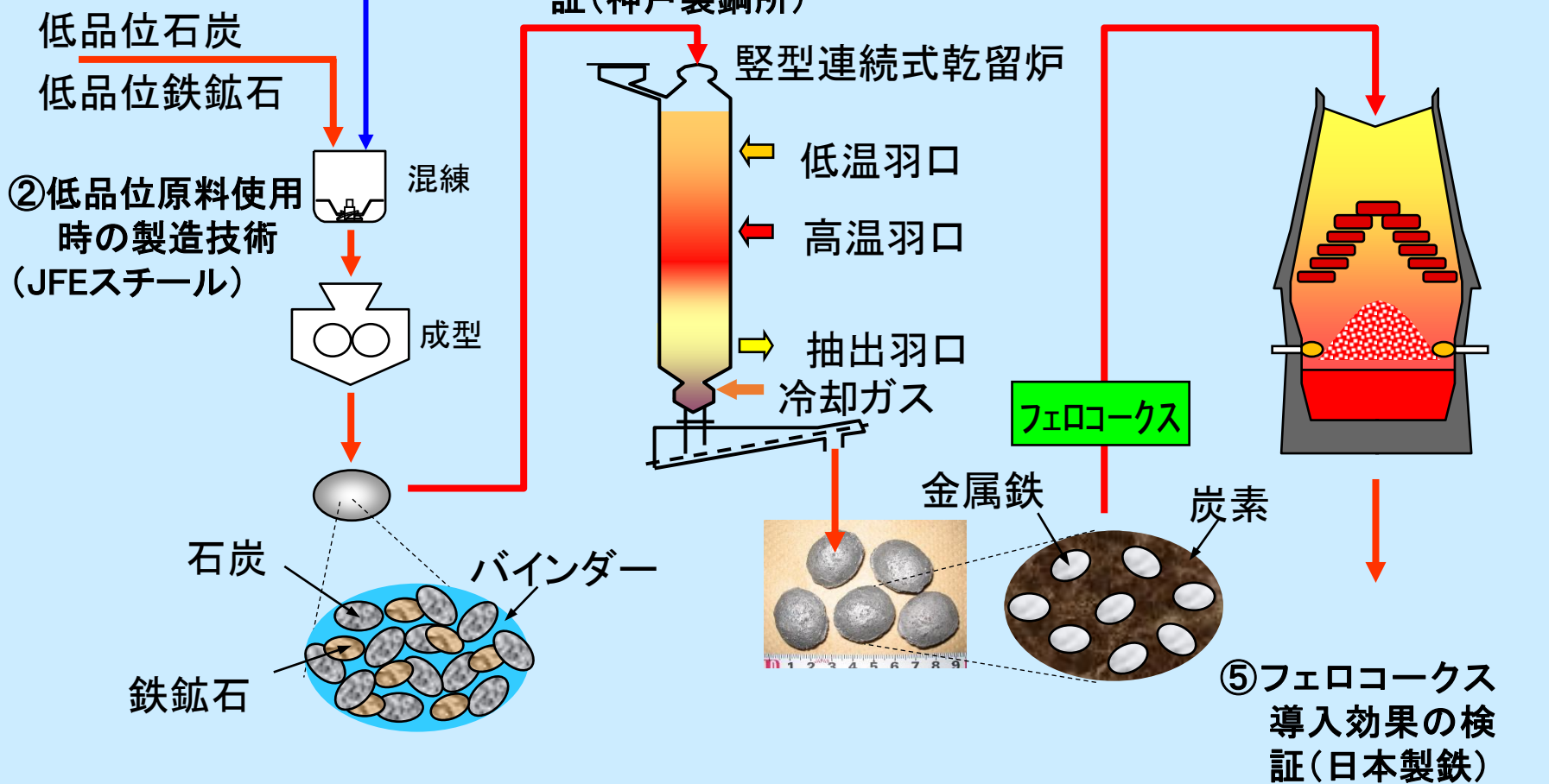
上記課題の解決により、アウトカム目標を達成

目標達成に必要な要素技術

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)

新規バインダー ④新バインダー強度発現実証(神戸製鋼所)

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)



テーマ毎の目標と根拠

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

最終目標(2022年度)

- ・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。

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

目標設定の根拠

➤ 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。

混合度:混合物の均質化の程度を表す指標。混合物全体から無作為に採取したサンプル中の着目成分の組成の標準偏差を用いて求める。

DI150/15 ドラム強度:JISK2151で規定される試験方法。

テーマ毎の目標と根拠

研究開発項目：一般炭、低品位原料使用時の製造技術

最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<p>・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>	<p>➤ 設定理由(成型物の強度(I型ドラム強度): ID30/15\geq85): 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。</p> <p>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。</p>
<p>指標: 成型物の強度 (I型ドラム強度): ID30/15\geq85</p>	<p>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)</p>

テーマ毎の目標と根拠

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

最終目標(2022年度)

・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、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。

指標：連続操業試験：30日以上

目標設定の根拠

- **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)：**
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(2022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。

テーマ毎の目標と根拠

研究開発項目：新バインダー強度発現実証

最終目標(2022年度)	目標設定の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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新規液体バインダーの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。工業的に低負荷となるフェロコークスの圧縮成型条件の提案。 	<p>➤ 設定理由:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フェロコークス普及時には、従来のASP(石油精製副産物)、SOP(コークス炉副産物)では量的に不足が想定されるため、代替バインダーの開発を実施。成型物およびフェロコークス強度は、製造プロセスおよび高炉安定操業を担保するための強度値として設定(室炉コークスを基準に設定) ・フェロコークス炉で副生されるタール(フェロコークスタール)の液体バインダー適用による供給安定化とコスト削減を実現するため。 ・将来の劣質原料を利用したフェロコークス成型物の汎用的な製造指標を得るため。
<p>指標:</p> <p>成型物の強度(I型ドラム強度): $ID30/15 \geq 85$</p> <p>乾留後塊成物の強度(ドラム強度): $DI150/15 \geq 80$</p> <p>冷間強度予測モデル解析結果の誤差: 10%以内</p>	<p>ID30/15(I型ドラム強度)</p> <p>鉄鋼業界で一般的に採用されている強度指標。</p> <p>DI150/15(ドラム強度)</p> <p>JISK2151で規定される強度試験方法。</p>

テーマ毎の目標と根拠

研究開発項目：フェロコークス導入効果の検証

最終目標(2022年度)

- ・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。
- ・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(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。

目標設定の根拠

- **設定理由(2022年度):**
フェロコークスの高炉使用時の効果検証において、⑤-2で得られた知見を反映した⑤-1のシミュレーションモデルを用いて福山3高炉操業解析を行い、モデルの精度を確認するとともに、製鉄所トータルでの評価を実施することで本プロジェクトの目標が達成できるものと設定。
- **設定理由(2022年度):**
省エネ10%という値は、本プロジェクトにおける最終目標値であることから、この値を目標指標として設定。

テーマごとの目標と達成状況

研究開発項目：①フェロコークス中規模設備での製造実証

①-1 中規模設備の開発

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

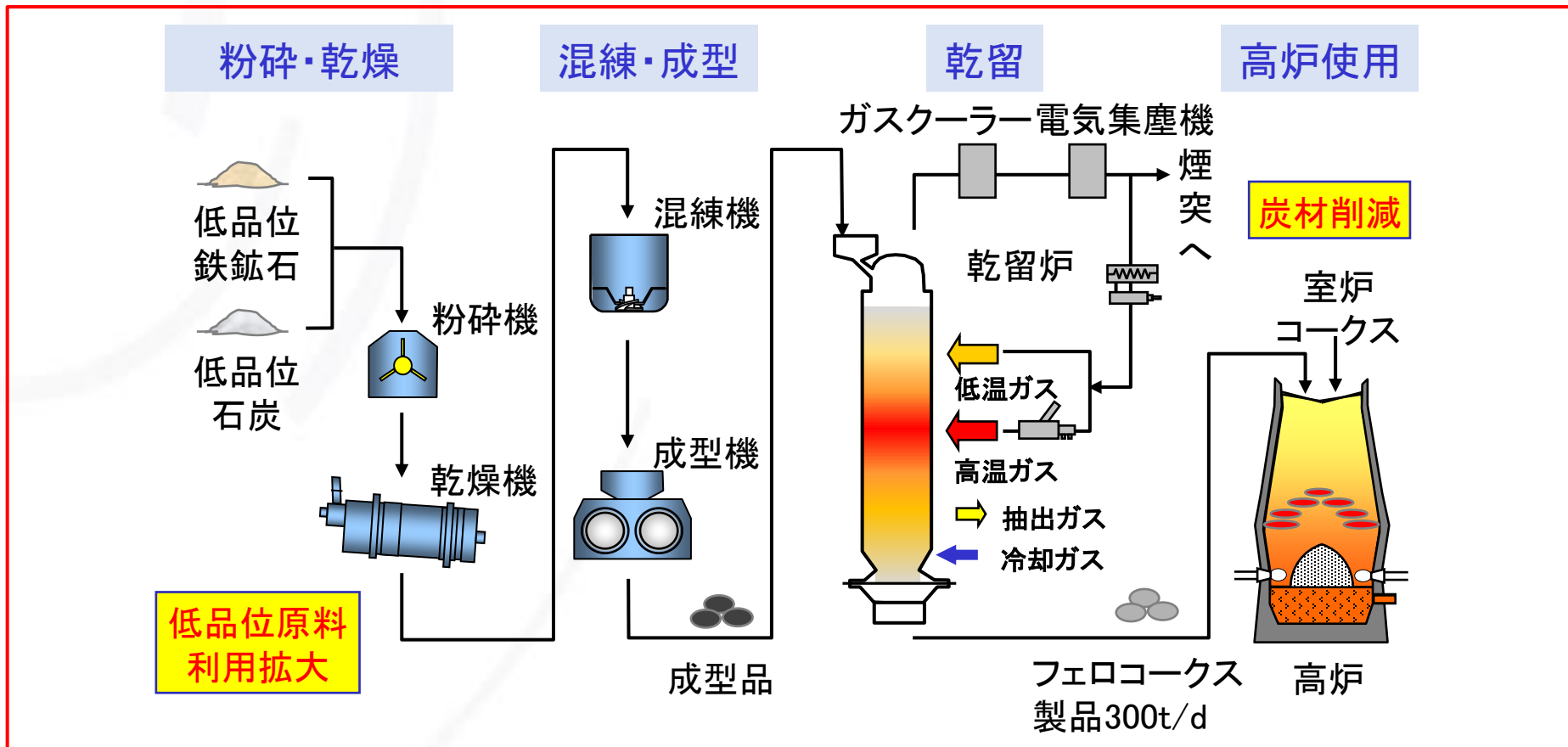
①-1-2 複数本羽口を有する中規模設備での乾留技術の確立

①-2 固液均一混合のシミュレーション

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<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確認する。 ・生産量300t/dで長期間安定稼働が可能なことを実証する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・混合・攪拌シミュレーションモデルを用いた混錬時間と強度の関係から中規模設備での混錬条件を設定。 ・降雨・設備トラブルのため生産量100t/dでの操業試験実施。 	○ ×	<ul style="list-style-type: none"> ・混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。 ・短期間での150t/d操業を実現。原料の棚吊り、居着き等で長期間操業は100t/dに留まる。能率/稼働率の改善が必要。
<ul style="list-style-type: none"> ・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"> ・石炭2銘柄配合、鉱石20%配合によりDI150/15\geq80を達成。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭配合、鉱石比率の最適化により高炉装入に耐え得る強度確保。
<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>ラボスケールで混錬時間と混合度の関係を検証。実機規模の混合・攪拌シミュレーションプロトタイプを完成。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。
<p>指標2:乾留後塊成物のドラム強度:DI150/15\geq80</p>	<p>DI150/15 ドラム強度DI150/15\geq80を達成。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭配合、鉱石比率の最適化により高炉装入に耐え得る強度確保。

①フェロコークス製造中規模設備での製造技術実証

①-1 中規模設備の開発



■ 研究開発の最終目標

生産量300t/dで長期間安定稼動が可能なことを実証する。

①フェロコークス製造中規模設備での製造技術実証

①-1 中規模設備の開発

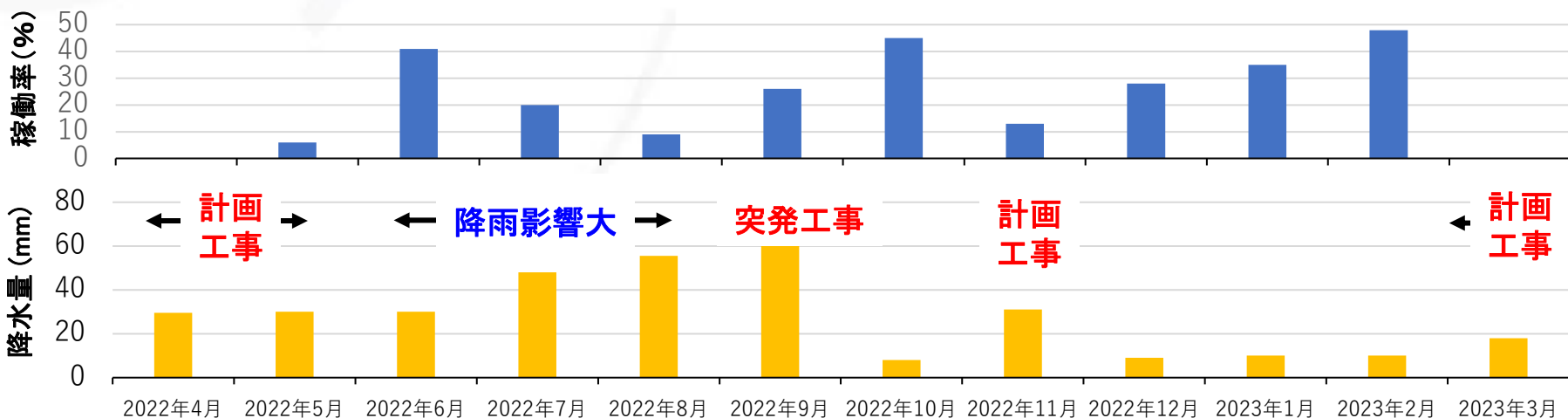
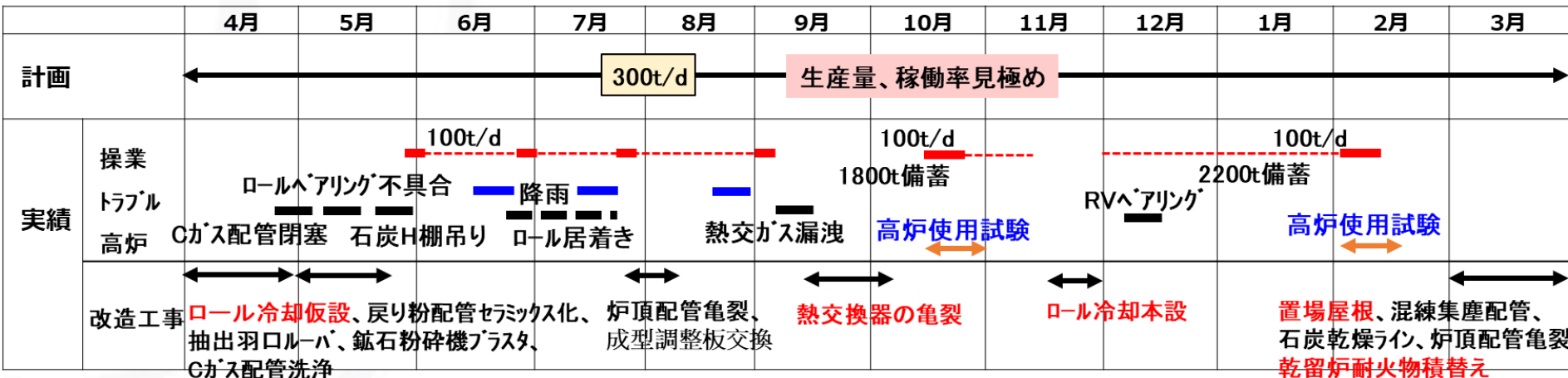
◆ フェロコークス中規模設備の外観



①フェロコックス製造中規模設備での製造技術実証

①-1 中規模設備の開発

■ 成果

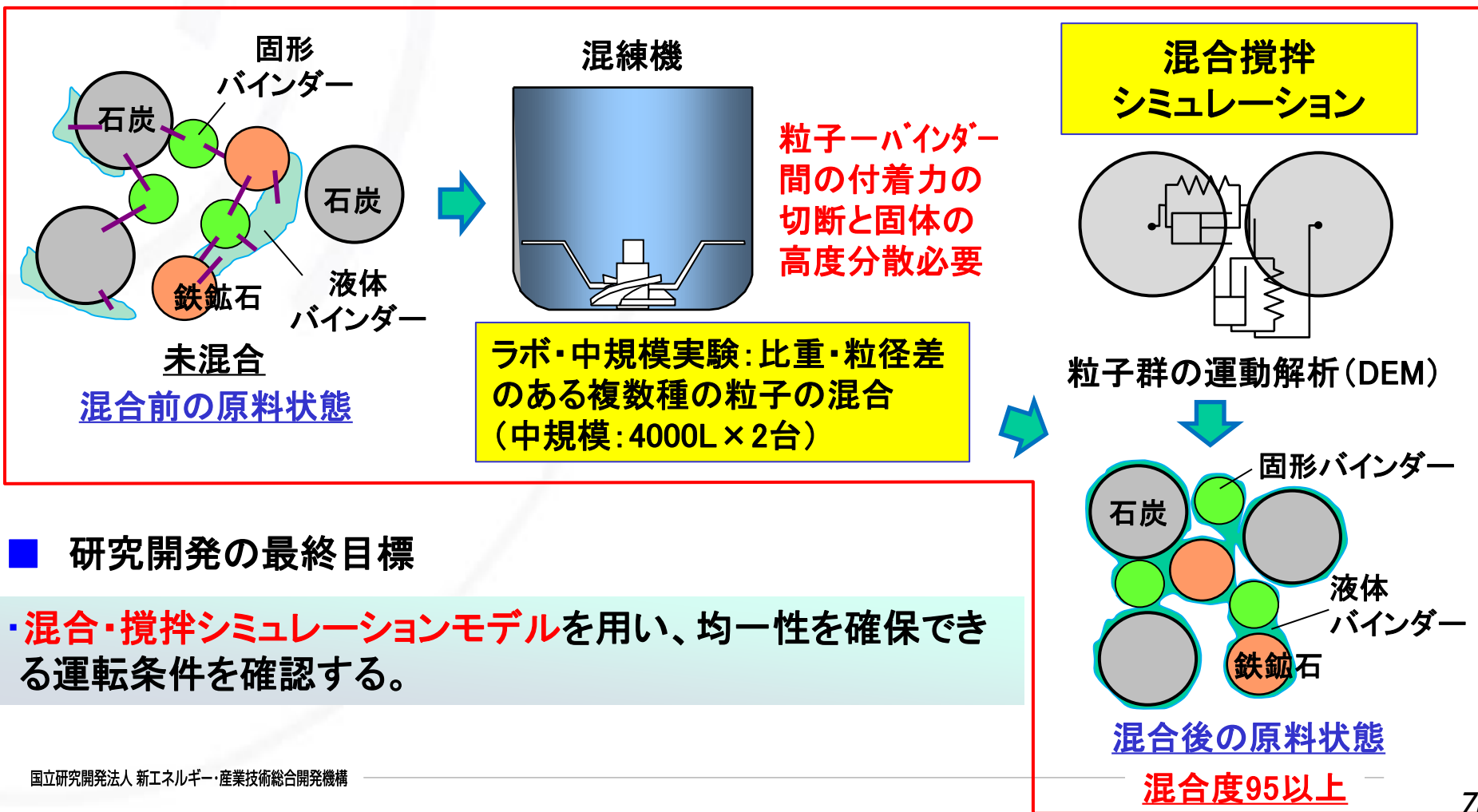


4月の計画工事を実施、成型ロール交換時のヘアリング不具合により約1ヶ月工事延長。生産量取戻しのため、6月から150t/dで操業するも成型ロール居着きが顕著となり、能率アップできず6月以降100t/dで作り溜め継続。低稼働率ながらも10月、2月に2回の高炉使用試験を実施。

- 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
- ① -2 固液均一混合のシミュレーション(東北大)

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 -1-1 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 固液均一混合のシミュレーション(東北大)



■ 研究開発の最終目標

・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確認する。

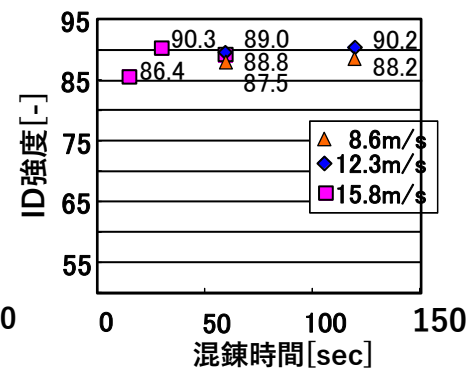
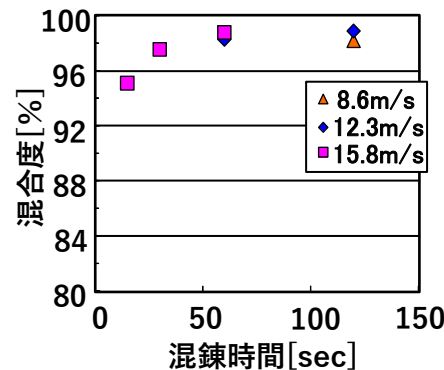
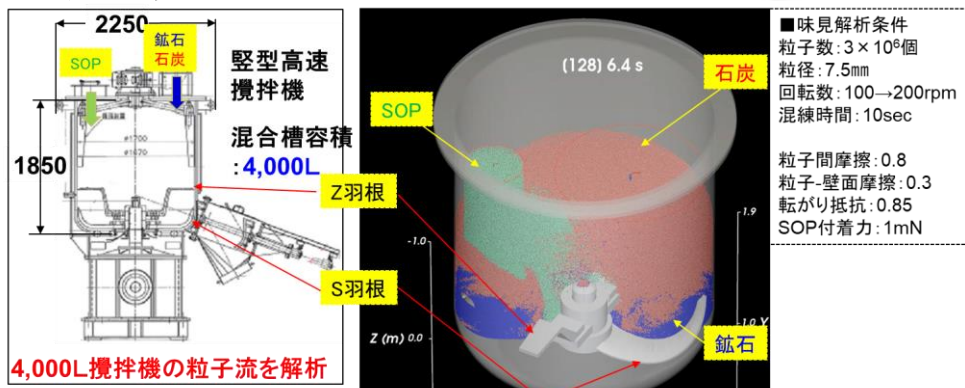
- ① -1-1 ラボ・中規模設備での比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立
- ① -2 固液均一混合のシミュレーション(東北大)

■ 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	
		1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q			
(1)比重・粒度が異なる原料の均一混合技術の確立	JFE	混合条件 4000L 評価				付着力・細粒化 着手 GPU増強				成型物 評価						
	東北大	75 L 実験				コード改造				操作評価						
	東北大	ラボ計算機				中規模(75L)解析				スパコン解析				操作評価		
										フィッティング						
										操作試験						

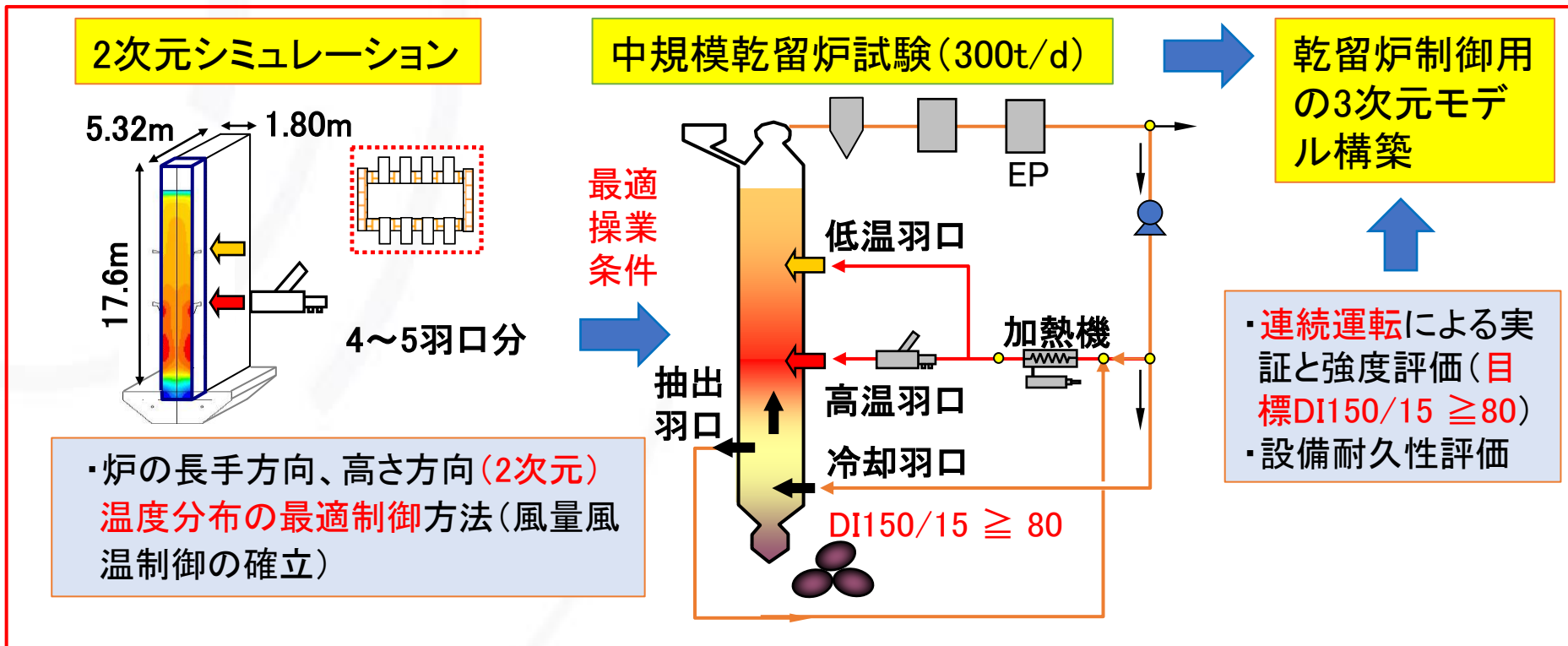
<混合攪拌シミュレーション>



混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプ

- ・混合・攪拌シミュレーションモデルのプロトタイプはプロトタイプは2019年度に完成。
- ・混練時間と混合度・強度の関係を導出し、操作条件に反映。

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



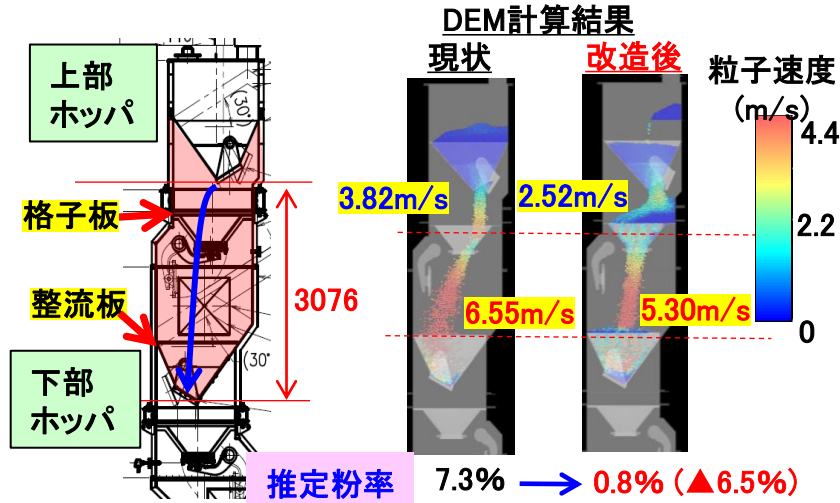
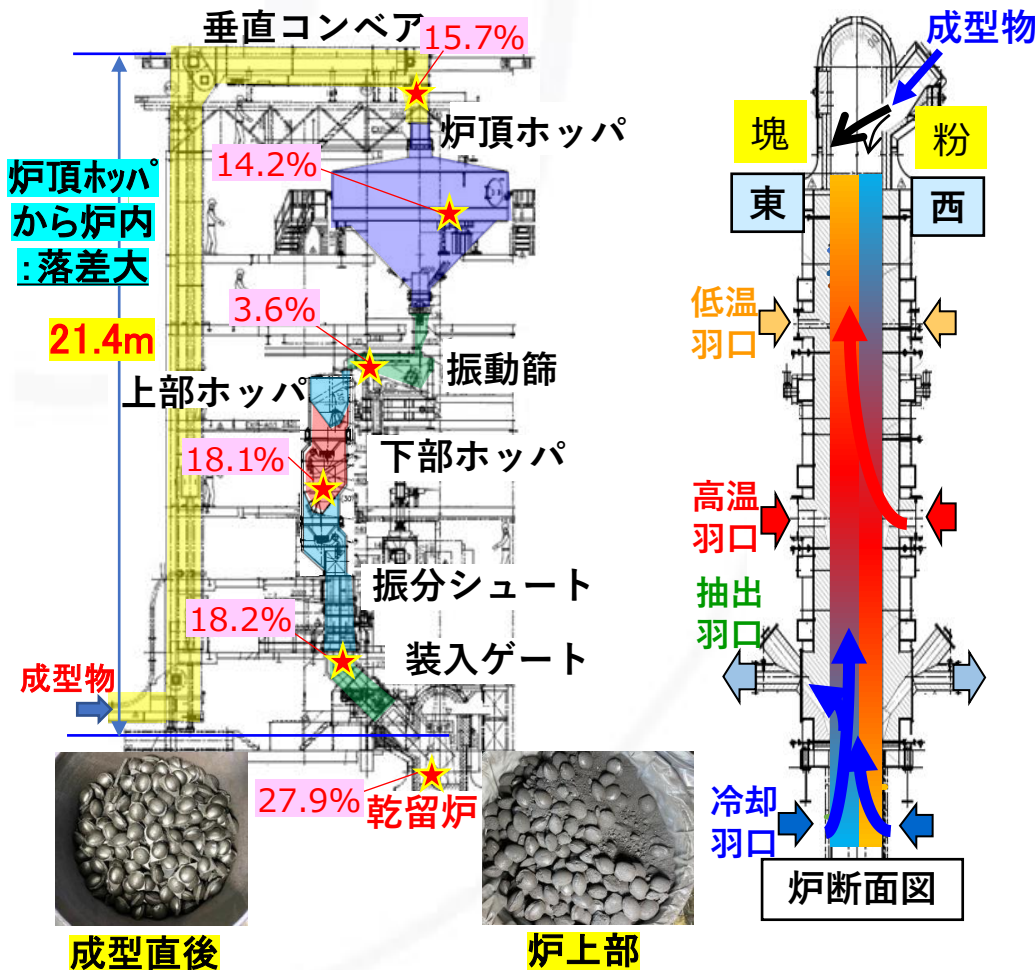
■ 研究開発の最終目標

・高炉装入に耐えうる乾留物の最適製造条件を確立する。

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

■ 成果

落下衝撃により成型物が粉化 → 炉内東西で温度偏差 → 落差低減のためストーンBOX設置



炉頂粉率 19.5% → 8.6% (▲10.9%)

ストーンBOX設置により乾留炉入側の成型物の粉率低下を確認し、炉内温度偏差を抑制。

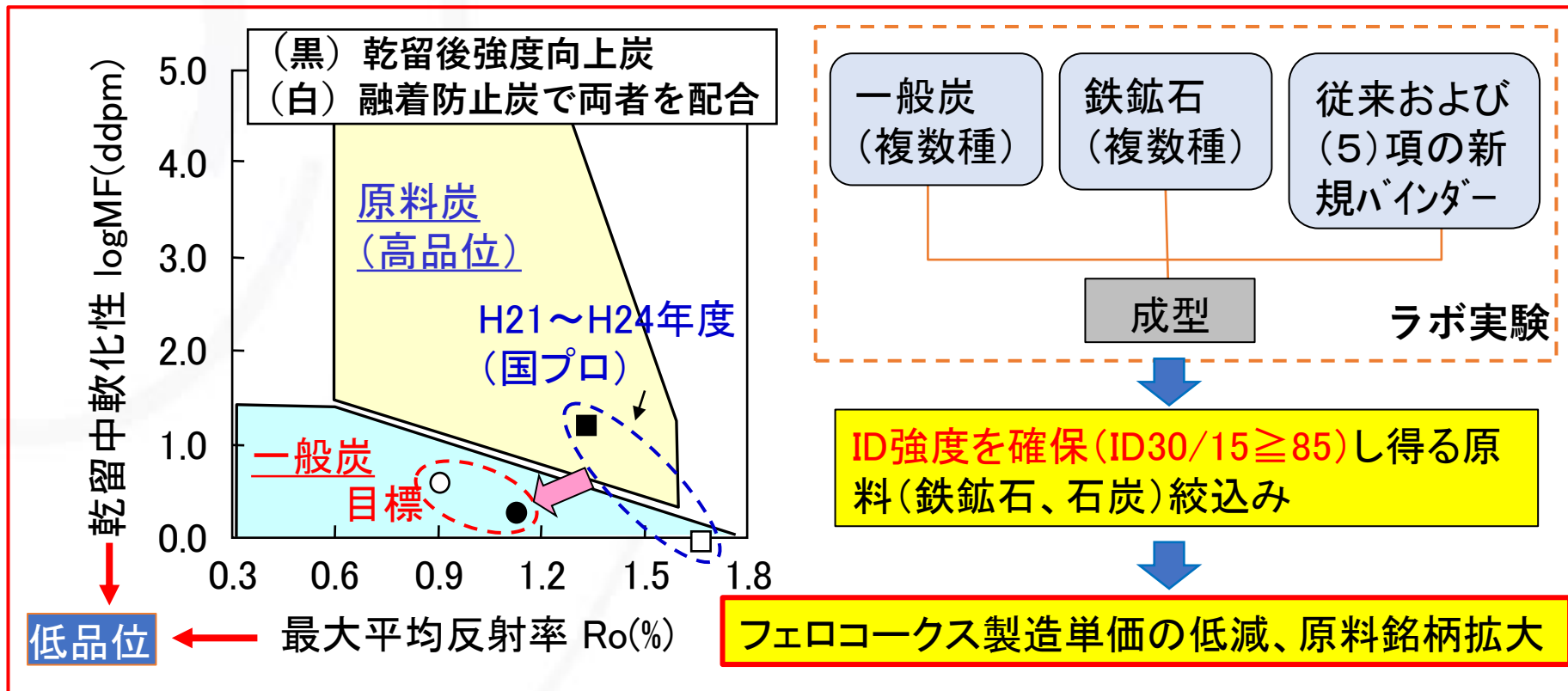
ストーンBOX設置により落下衝撃緩和 → 持込み粉低減: 温度偏差抑制

テーマごとの目標と達成状況

研究開発項目：②一般炭,低品位原料使用時の製造技術

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<p>・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>	<p>・ラボスケールにおける原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みを行い、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した。</p> <p>・戻り粉、フェロタルのリサイクルは未実施。</p>	<p>○</p> <p>×</p>	<p>・ラボスケールにおける原料(鉄鉱石、石炭)の絞込みを行い、一般炭4銘柄、PC炭3銘柄、鉄石2銘柄が適用可能なことを検証し、達成と評価。更に、これら原料を中規模設備において使用試験を実施し、フェロコークス目標強度DI150/15\geq80を達成。</p> <p>・戻り粉、フェロタル使用により成型物の歩留り低下。歩留り向上が課題。</p>
<p>指標:成型物の強度(I型ドラム強度):ID30/15\geq85</p>	<p>中規模設備で製造した成型物の強度ID30/15\geq90を達成。</p>	<p>○</p>	<p>ラボスケールでの混合度試験結果と合致した東北大学の混錬・攪拌シミュレーションによる混錬時間と成型物強度の関係を反映し、達成と評価。</p>

② 一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証



■ 研究開発の最終目標

- ・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。

② 一般炭、低品位原料使用時の製造技術実証

■ 成果

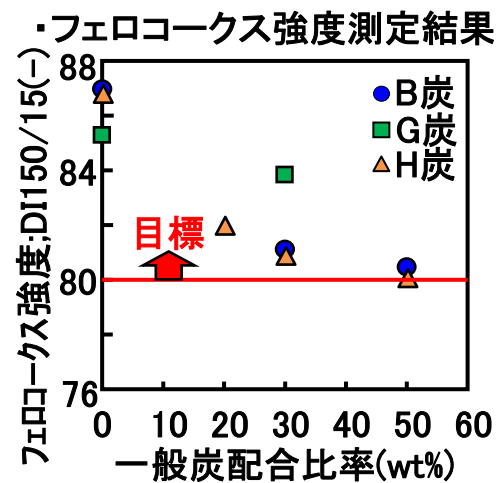
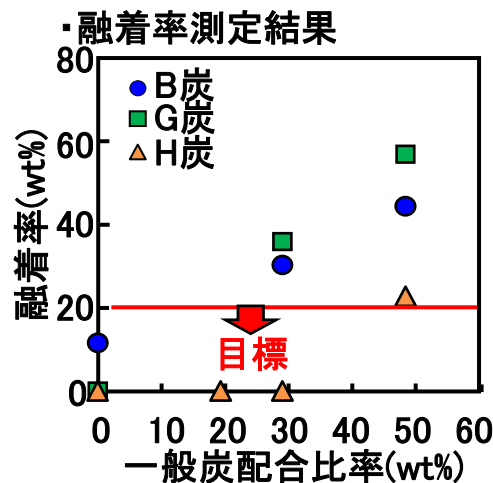
技術開発項目	担当	2017年度				2018年度				2019年度				20年度	21年度	22年度	
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q				
(2)一般炭、低品位原料使用時の製造技術	JFE	ラボ成型・乾留試験着手				成型物・フェロコクス品質評価				長期使用原料				操業試験	原料確定		
		① 低品位原料絞り込み								② 長期操業試験				③ カナダ鉱石評価			

◆フェロコクス使用候補PCI炭、一般炭を選定し、乾留後の融着性・品質を調査

<事業期間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

2019年度実績



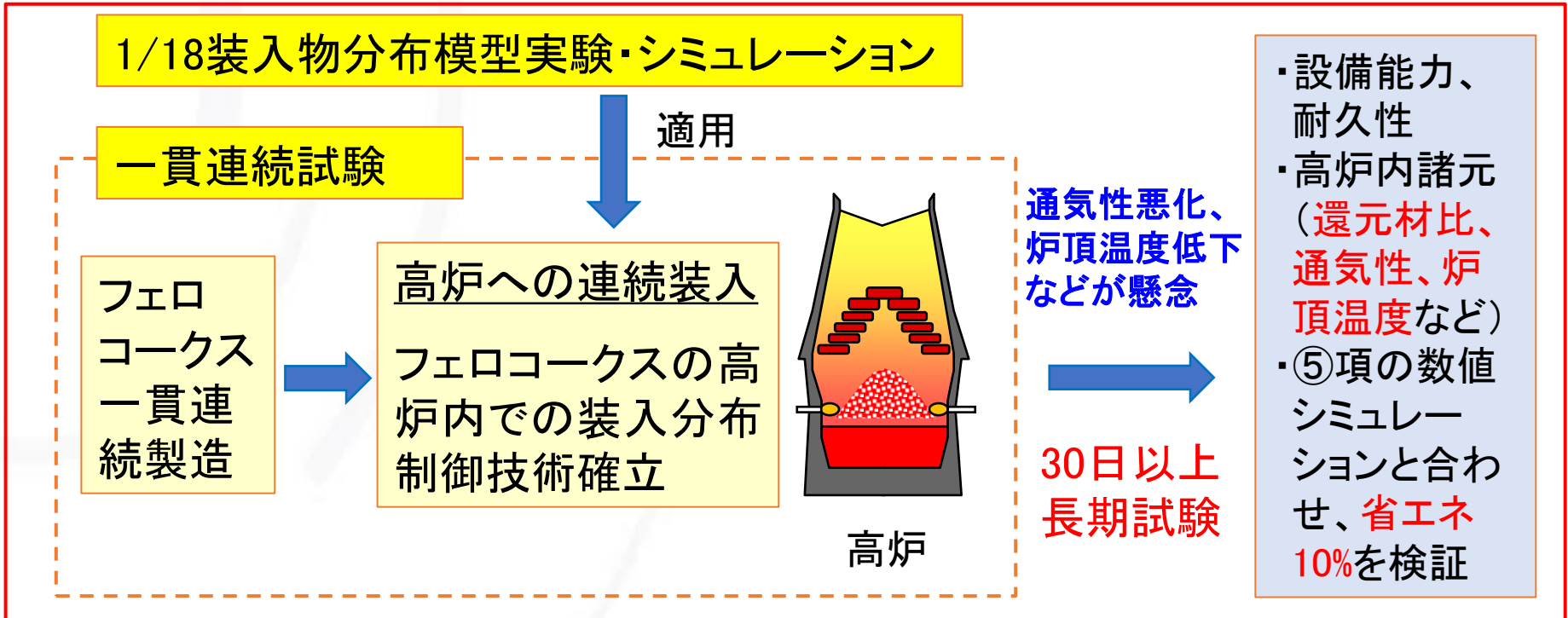
選定した一般炭2銘柄および低品位鉄鉱石1銘柄および従来品のバインダーを用いて、中規模設備で成型を行い、成型物強度を確認。

テーマごとの目標と達成状況

研究開発項目：③実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<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。</p> <p>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%を検証する。</p>	<p>・高炉装入試験のため、フェロコークス約2000～3000tの作り溜めを行い、装入原単位30kg/tの高炉装入試験約2週間を2回実施。</p> <p>・フェロコークス多量使用時のFS検討を実施し、高炉工程における還元材比11%の削減、製鉄工程の省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減の全てを達成できる可能性があることを見出した。</p>	<p>△</p> <p>○</p>	<p>・フェロコークス装入原単位30kg/tを計画通り実施。1回目の高炉装入試験では期待値通りのRARの低減を達成。2回目の試験では、通気性悪化により連続操業は約2週間に留まったが、操業上の課題が明らかとなった。通気性改善のための高精度分布技術の開発が必要。</p> <p>・多量装入時に課題となる鉱石の還元速度低下に対し、様々な対策技術(被還元性アップ、装入物分布適正化、炉頂ガス循環等)を導入することで、省エネ11%達成を見込める。</p>
<p>指標：連続操業試験：30日以上</p>	<p>高炉装入試験、連続操業約2週間。</p>	<p>×</p>	<p>フェロコークスの作り溜めによる高炉での連続使用。</p>

③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証



■ 研究開発の最終目標

- ・**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、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。**

③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

■ 成果

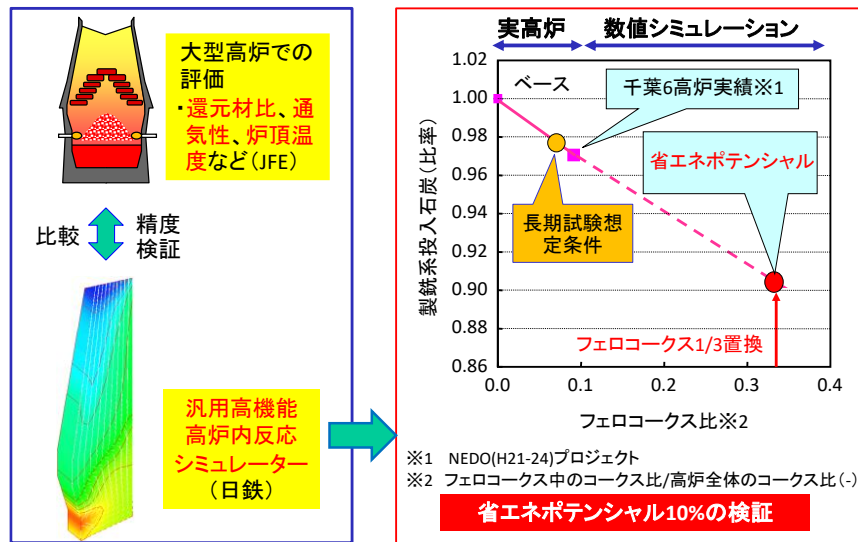
・評価前提

フェロコークス装入原単位30 kg/tまでの省エネ効果は、JFEでの実炉試験により実証。これ以上の装入量効果については、日本製鉄の汎用高性能高炉シミュレーターの精度を実炉データと比較して確認したうえで、本モデルを多量装入時の推算に使用。

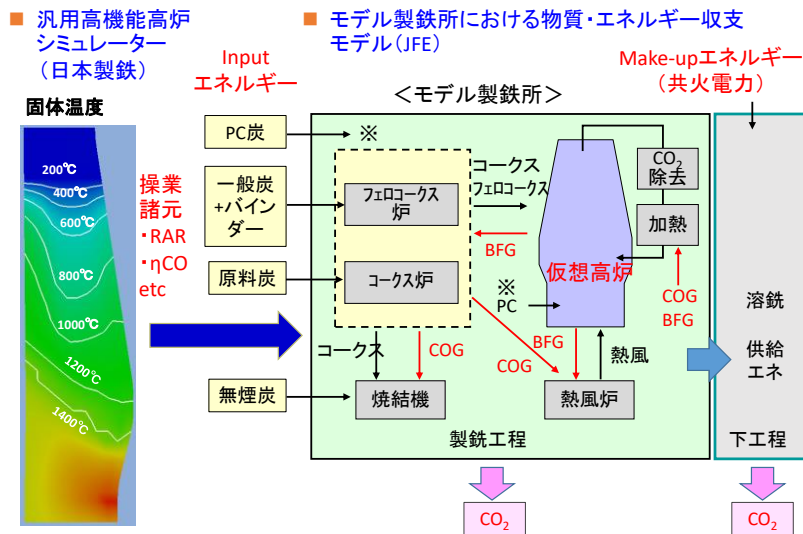
・解析方法

解析は、日本製鉄の汎用高性能高炉シミュレーターとJFEのモデル製鉄所を対象とした物質・エネルギー収支モデルを使用。

高炉シミュレーターの結果のうち、主要な諸元(RAR, η COなど)を物質・エネルギー収支モデルにおける「仮想高炉」に反映させ、その条件において、製鉄工程ならびに製鉄所全体の両者をバウンダリーとして物質収支(特にCO₂発生量に關係する炭素(C)収支)、およびエネルギー収支計算を行う。フェロコークスを使用しないベース条件と使用した場合の差をフェロコークスによる効果と捉え、エネルギー削減量、CO₂発生削減量を評価。



製鉄工程における省エネの目標



モデル製鉄所における省エネ・CO₂削減量の評価方法

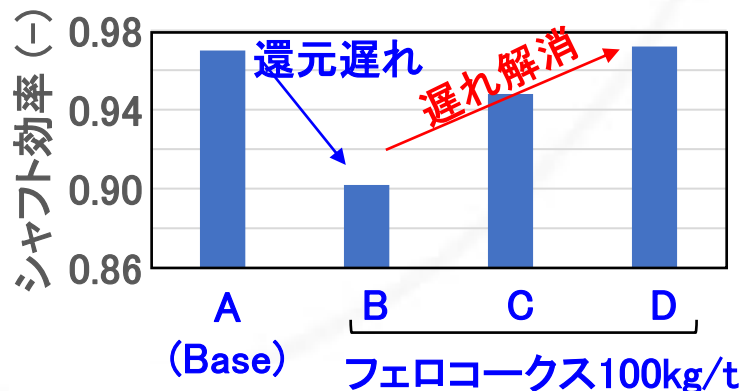
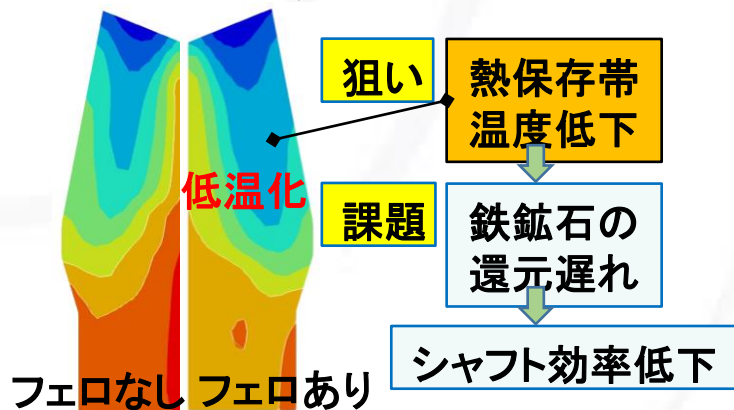
③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

■ 成果

フェロコークス装入による高炉還元材比(RAR)の変化を汎用高機能高炉シミュレーターを用い検討

装入量が少ないときは目標のRARラインに沿う傾向、一方、装入量を増すほど大きく乖離
 装入量増に従い熱保存帯温度が大きく低下 ⇒ 還元が追従できず、還元平衡から外れRARが上昇

■ フェロコークス装入の狙いと課題、対策



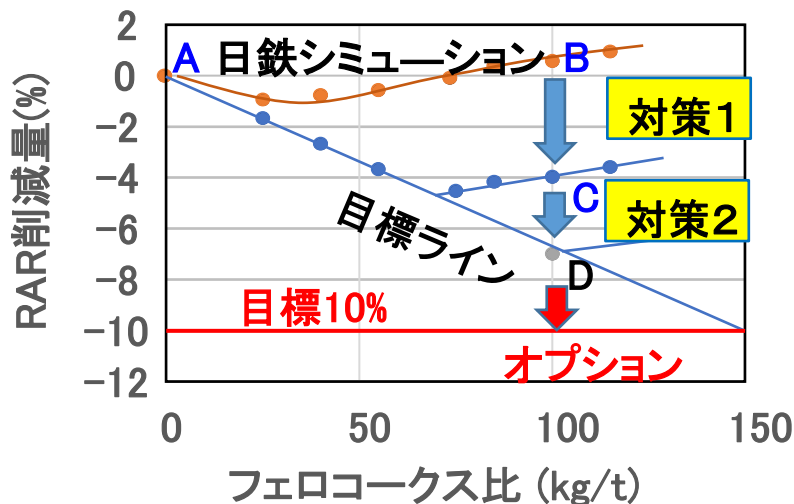
■ 各種対策によるRARの低下量とその限界について

対策1

被還元性の改善 (RI: 55→75)

対策2

還元ポテンシャルアップ(分布改善等)

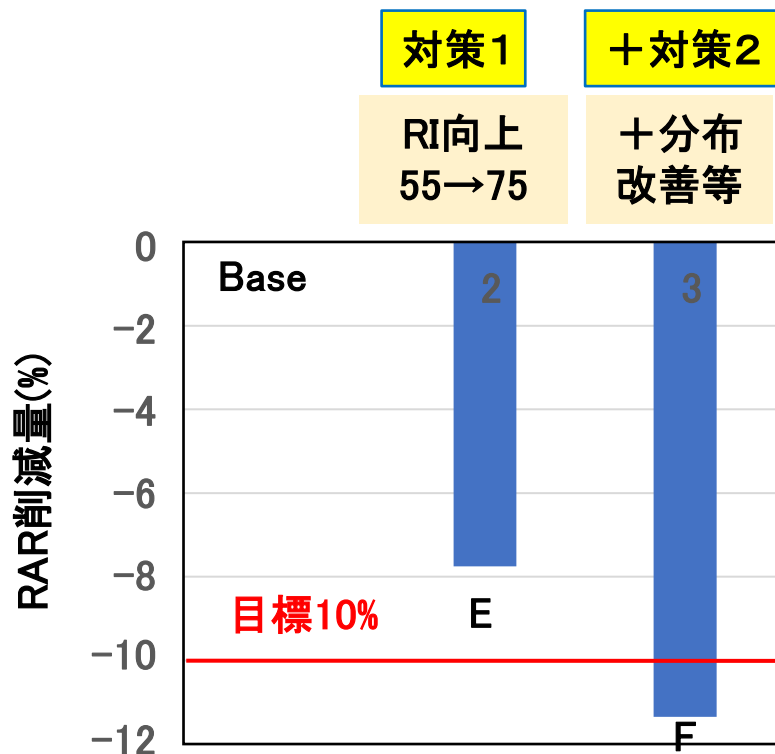
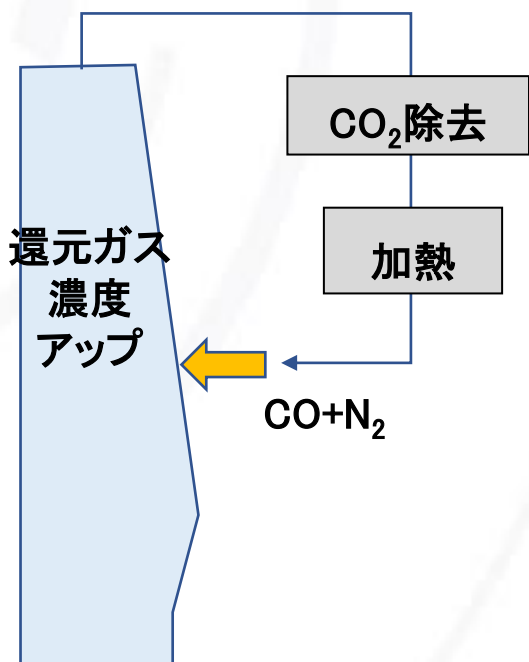


通常高炉においてはフェロコークス比100kgでRAR▼7%程度が限界(D点)

③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

■ さらなる低RARオプション(@フェロ100kg/t)

炉頂ガス循環(COURSE50要素技術)の適用

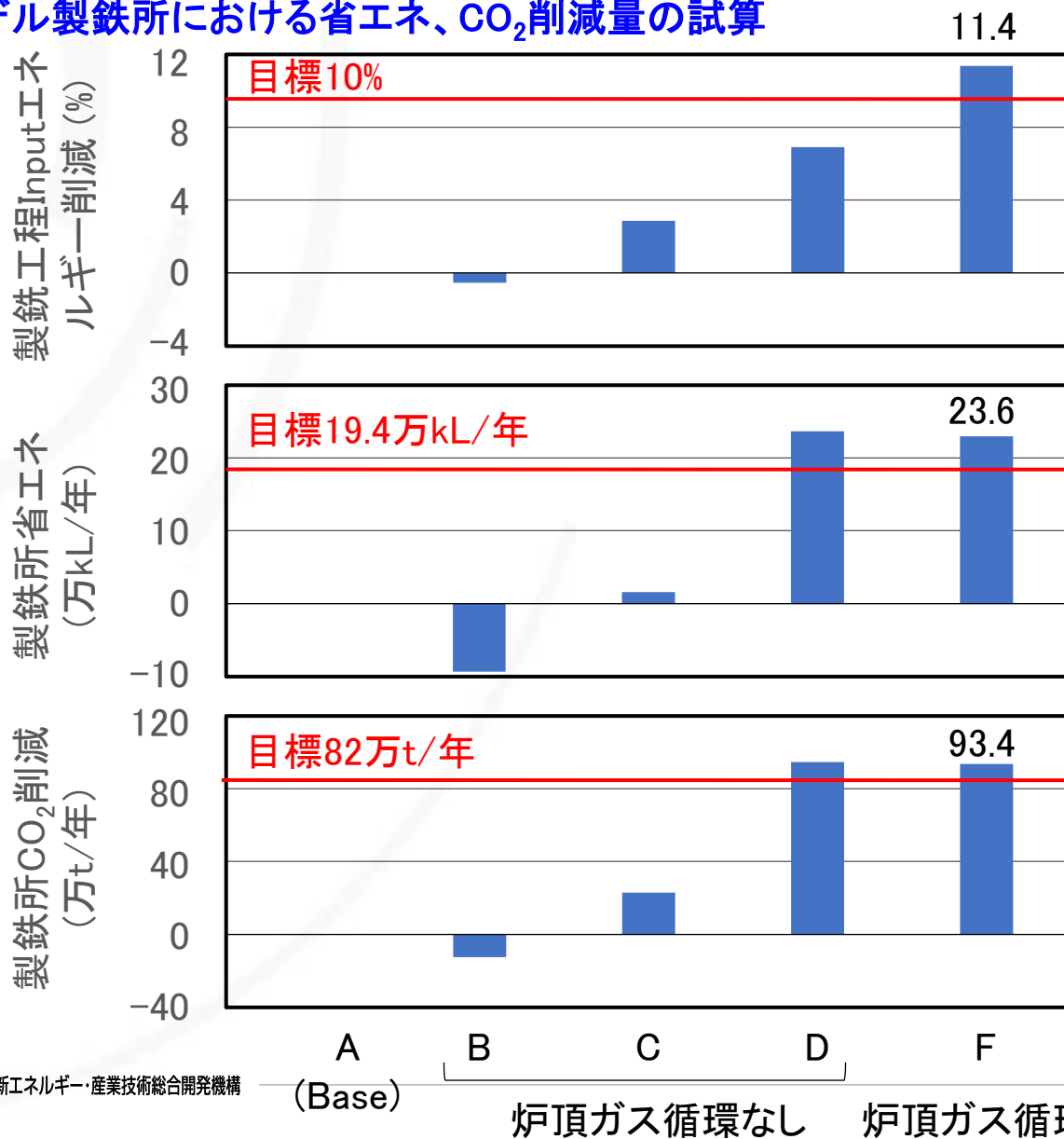


▼11%まで削減できる可能性

フェロコークス使用時に鉄鉱石の還元遅れを解消して、RARを狙い通りに低下させるためには、フェロコークス装入と同時に鉱石側の被還元性を上昇させる、あるいはガス側の還元ポテンシャルを増すなどの操作が不可欠。更に、COURSE50の要素技術である炉頂ガス循環技術(炉頂ガス中のCO₂の除去と加熱後、シャフト下部へ吹き込み、炉内のCO濃度を高める技術)を適用することでRARの低下は最大約11%まで拡大(F点)。

③ 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証

■ モデル製鉄所における省エネ、CO₂削減量の試算



フェロコークス比100kg/tにおいて、前述のRARの低下操作によって、製鉄工程の省エネは目標10%に対して最大約11%を実現できる可能性。また、2030年に5基導入された場合、製鉄所全体での省エネ、CO₂削減量は23.0万kL/年、93.4万t/年となり(条件F)、アウトカム目標値を達成できる可能性。

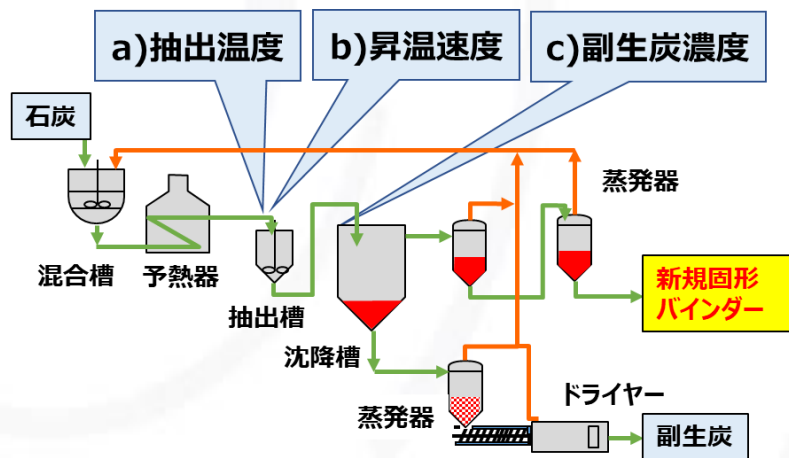
テーマごとの目標と達成状況

研究開発項目：④新バインダー強度発現実証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<ul style="list-style-type: none"> ・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新規液体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。工業的に低負荷となるフェロコクスの圧縮成型条件の提案。 	<ul style="list-style-type: none"> ・新規固形バインダーを用いて製造した成型物とフェロコクスにおいて目標強度値を達成し、且つASP以上の強度向上効果を有することを確認。社会実装へのスケジュール案と実証プラントの概念設計案を提示した。 ・フェロコクスタールを原料に蒸留分画し、成型温度域での粘度をSOPと同等に調整することで好適な液体バインダーが調製できることを明らかにした。製造プロセス案として、フェロコクス炉のタール処理工程に付設する減圧フラッシュ蒸留ユニットの概念を提示した。 ・離散要素法に基づく数値解析より、石炭+バインダー+鉄鉱石の混合系からなる成型物の冷間強度を表現できるモデルを提案した(解析誤差:10%以内)。 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ ○ ○ 	<p>ASP以上の強度向上効果を有するバインダーを開発したこと。また社会実装可能なプロセスを提示したこと。</p> <p>液体バインダーに必要な機能(粒子潤滑性の付与と粒子間の接着力)の代表指標として、成型温度域の粘度が活用できる事を明らかにし、社会実装可能なプロセスを提示したこと。</p> <p>開発したモデルから、ブリケット成型時のダブルロールの二軸間の線圧の最適化(動力、生産効率の最適化)に活用が可能であること。</p>
<p>指標:成型物の強度(I型ドラム強度):ID30/15\geq85 乾留後塊成物の強度(ドラム強度):DI150/15\geq80</p>			

④-1 新規固形バインダーの性能実証

(1) 新規固形バインダー製造プロセスの最適化



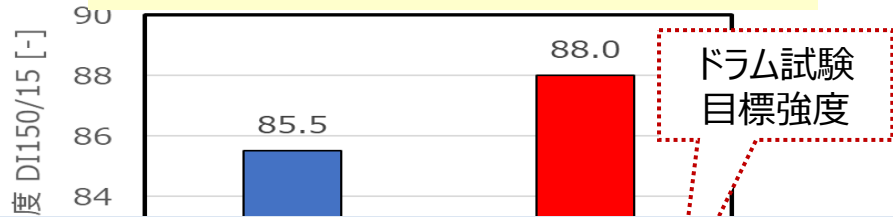
当社ラボ試験の結果より、新規固形バインダー連続製造設備（石炭処理量：0.1ton/d）における製造条件を、
a) 抽出温度380℃
b) 昇温速度>150℃/min
c) 副生炭混入率15%以下 に設定した。
 →上記条件にて約2tonを製造し、中規模設備による成型試験および品質評価を実施した。

新規固形バインダーの製造フロー

成型物のI型強度試験結果



フェロコークスのドラム試験結果 (成型物抜き出し品の試験炉乾留物)

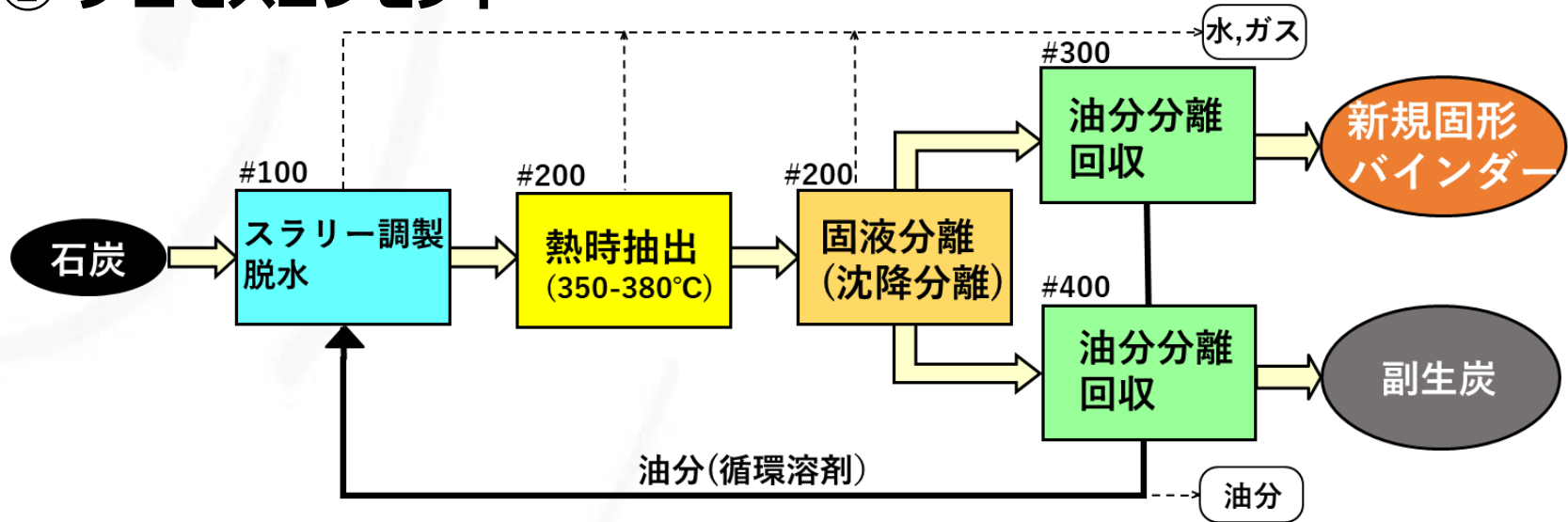


新規固形バインダーの使用により、成型物および乾留物の何れも目標強度を達成するだけでなく、ASP使用時以上の強度発現を確認した。

④-1 新規固形バインダーの性能実証

(2) プロセスコンセプトと製造プロセス商業化に向けた計画案

① プロセスコンセプト

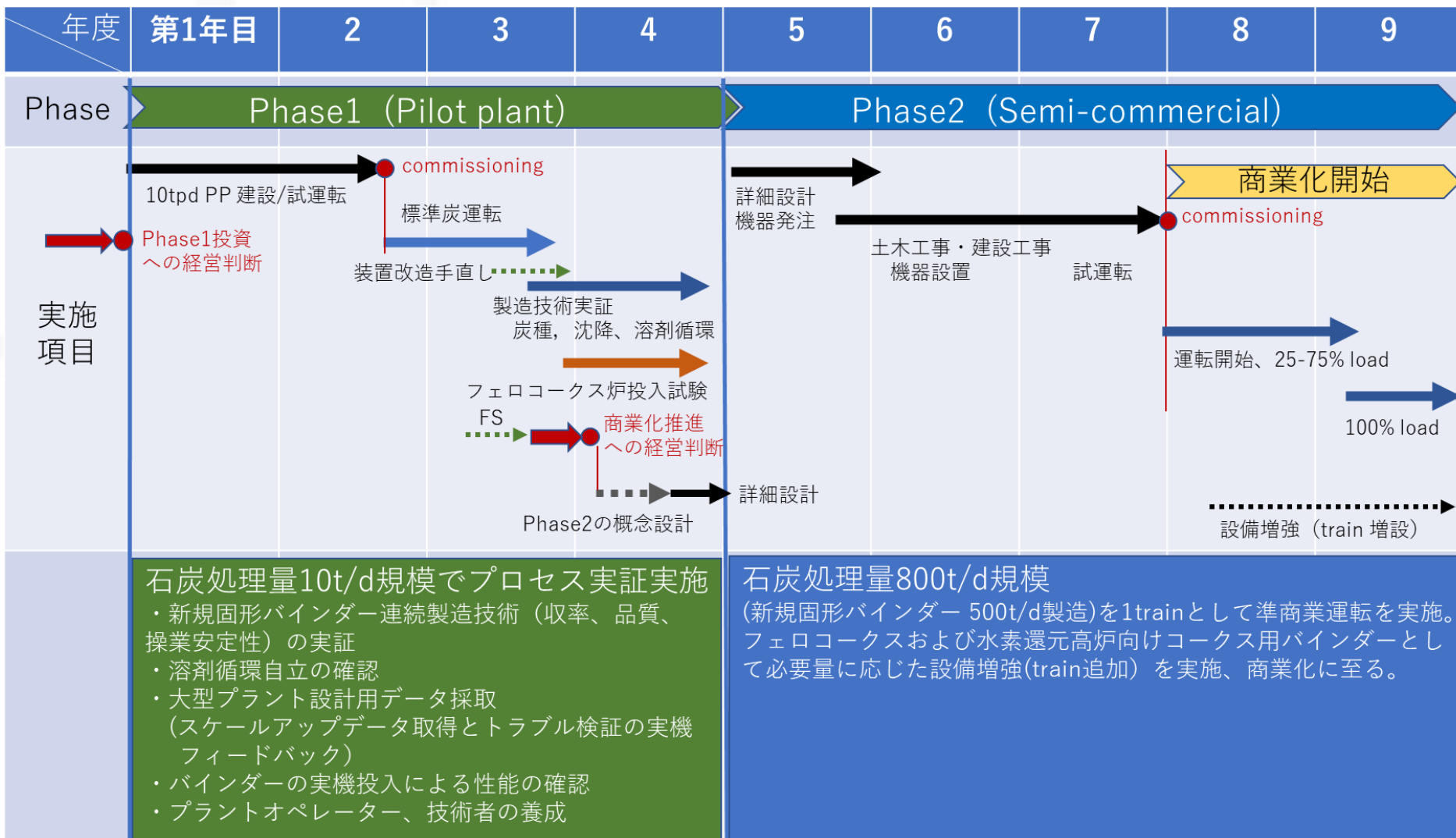


低コストな製造プロセスを構築するためのコンセプト

- 石炭の高次凝集構造を熱的に緩和する熱時抽出により熱可塑性に富む抽出炭(新規固形バインダー)と溶剤に溶けない副生炭を製造する。 ➡ **安価な一般炭を活用、副生炭は自家発電燃料に活用**
- 重力沈降法を用いる固液分離。 ➡ **静機器構成による低コスト化と高い操業安定性**
- 石炭自生油分(2環芳香族程度)による溶剤の完全循環。 ➡ **メイクアップ溶剤コストを排除**
- 抽出温度は380℃以下、高圧機器の設計圧力は1.5~2.0MPa以下。 ➡ **機器コスト低減に寄与**

④-1 新規固形バインダーの性能実証

② 商業化に向けた計画案



④-2 新規液体バインダー開発

フェロークスタールは、SOPに比べ軽質成分を多く含むため、バインダー利用には改質（重質化）が必要

(1) フェロークスタールの改質方法の検討

	重質化方法	狙い	改質	効果	工業化
1	低沸点成分の除去	蒸留により低沸点成分を除去し、粘度等のバインダー特性を制御	○	○	○
2	重質成分との混合熱処理	重質な新規固形バインダーと混合熱処理をすることで、粘度等の特性を制御	○	○	△
3	抽出溶剤利用	石炭抽出溶剤の一部として利用。固形/液体バインダーの特性を有するバインダーを製造	○	△	△



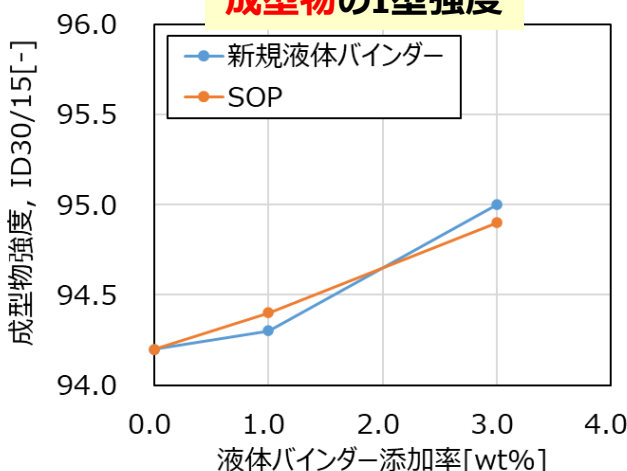
フェロークスタール



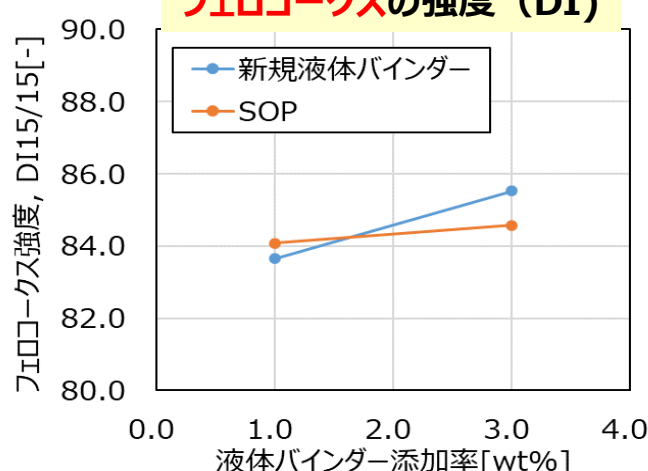
(2) 強度評価

370℃, 2mmHgの条件で新規液体バインダーを2kg試作、JFEスチール社で評価

成型物のI型強度



フェロークスの強度 (DI)



・(常圧換算)350~370℃以下の留分をカットすることでSOPと同等の性能を有する液体バインダーを得た。
 ・強度評価にてSOPと同等の性能を満たすことを確認した。

④-2 新規液体バインダー開発

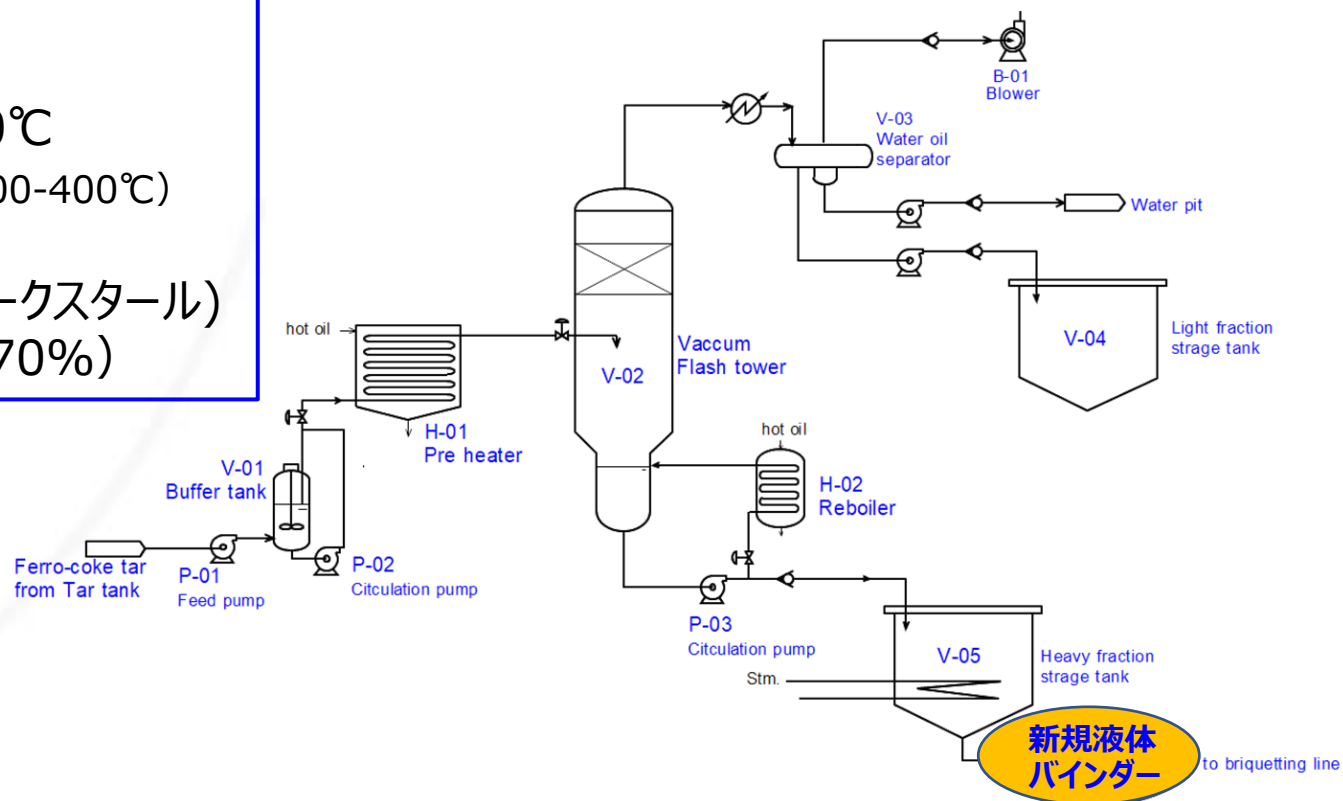
(3) 新規液体バインダー製造プロセスの概念

低沸点成分の除去には、汎用的な減圧フラッシュ蒸留法が適切であると判断し、フェロコークス炉（中規模設備）のタール処理工程近傍に設置するものとした。

(4) スケマチックフローと操業条件

【操業条件】

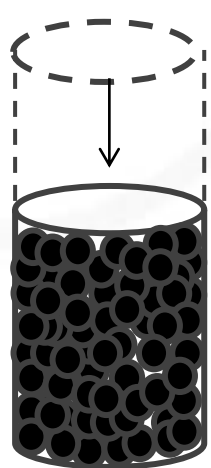
- ・蒸留時圧力：60mmHg
- ・フラッシュ温度：200-300℃
(常圧換算 300-400℃)
- ・熱媒加熱式予熱器採用
- ・処理量：2.0t/h(フェロコークスタル)
(バインダー得率として50-70%)



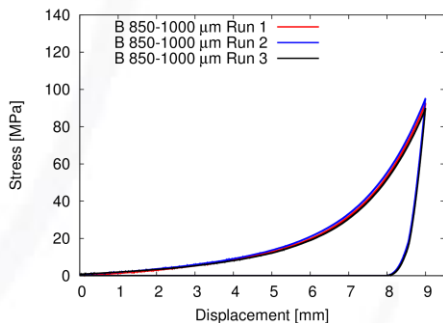
④-3 新規固形および新規液体バインダーの冷間強度発現機構の解明 (東北大)

フェロコークス成型物の汎用的な製造指標を得るため、バインダーによる粒子表面の潤滑性と接着力を考慮した粒子運動の解析手法を検討

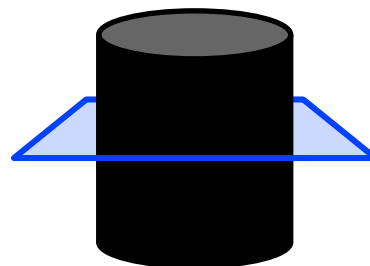
数値解析



バインダーなし/存在下で検討、モデル化



応力の挙動

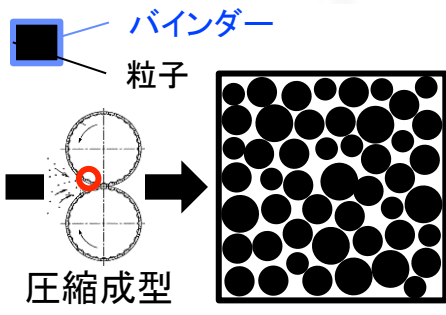


成型物の内部構造

実験



実測値との比較によるモデルパラメータの決定とモデルの妥当性の確認



⇒ 離散要素法 (DEM) をベースに
圧縮成型過程から成型体の破壊まで
を予測するモデルを構築する

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 (東北大)

(1) 冷間強度予測モデルの構築

(実験におけるバインダーの影響)

バインダーの混合により・・・、
 圧縮試験時の最大応力が低下
 ⇒バインダーが浸透、潤滑材として機能
 破壊試験において強度が向上
 ⇒成型物の緻密化、粒子間接着の効果

実験時の現象を定性的に表現できるモデルを検討

(圧縮挙動予測モデル)

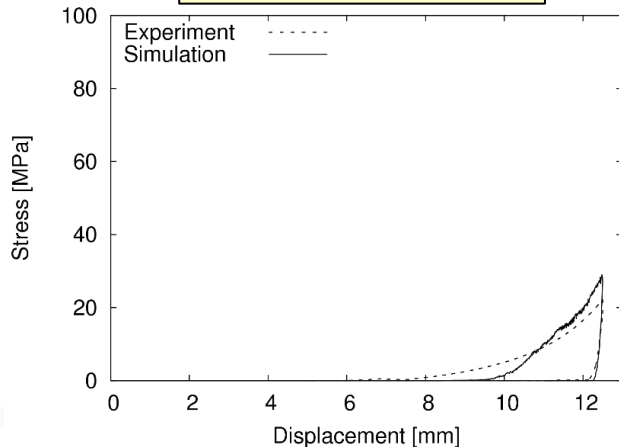
バインダーの機能を適正なパラメータ(ばね定数、摩擦係数)にて表現

(破壊挙動予測モデル)

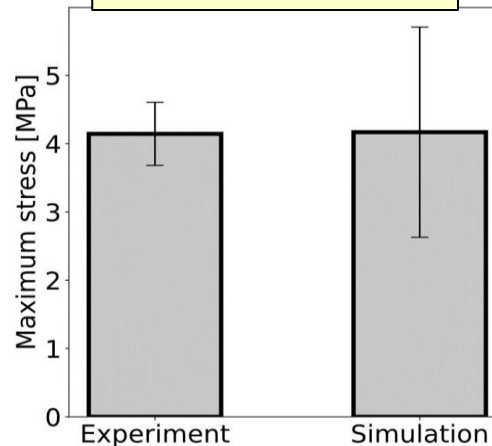
「粒子間の引張力」を考慮することで成型体強度を予測

(2) 石炭:鉄鉱石:液体バインダー (60 : 30 : 10) 混合系での解析結果

圧縮挙動解析



破壊挙動解析



フェロコークスの各種原料の混合系においても実験結果を良好に予測可能な冷間強度予測モデルを構築した

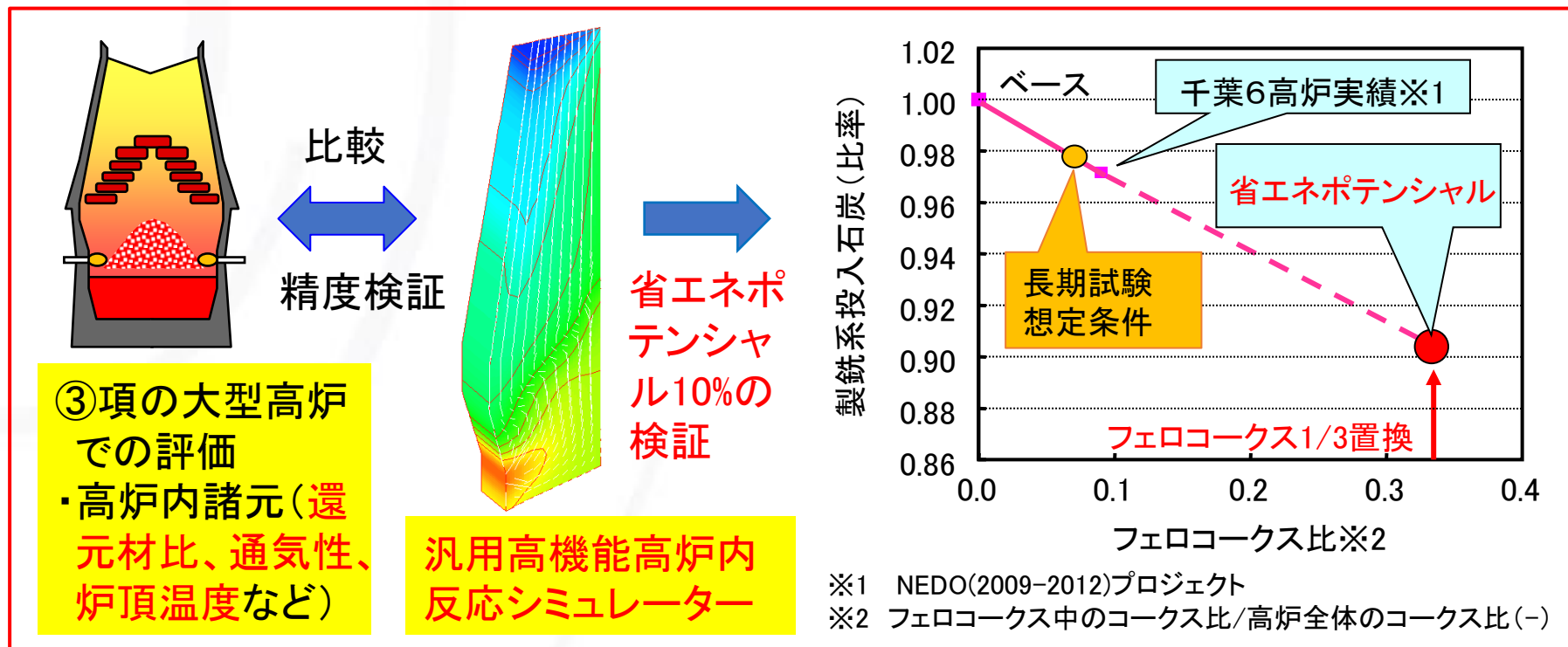
テーマごとの目標と達成状況

研究開発項目：⑤フェロコークス導入効果の検証

最終目標(2022年度)	成果(実績)	達成度	達成の根拠
<p>・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。 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>・福山3高炉の操業実績を解析し、フェロコークス30kg/t装入時の操業諸元変化を高炉数学モデルの精度検証を実施。 ・フェロコークス多量使用時のFS検討を実施し、高炉工程における還元材比11%の削減、製鉄工程の省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減の全てを達成できる可能性があることを見出した。 ・一般炭、低品位原料を用いて中規模製造設備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た。</p>	○	<p>・福山3高炉の操業実績をシミュレーションモデルが精度よく再現できており、解析精度は十分と判断。 ・フェロコークス多量使用時の課題となる鉱石還元速度の低下に対して種々の対策を実施することで省エネ目標を達成できることを確認。 ・定式化したフェロコークス反応速度の知見を福山3高炉の操業解析でそのまま使用し、操業実績を精度よく表現していることを確認。</p>
<p>指標： 製鉄工程省エネ10%減</p>	<p>・還元材比11%の削減、製鉄工程省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO2削減。</p>	○	<p>・数値シミュレーション(⑤-1)と製鉄所トータル評価(③)によるFS検討結果より判断。</p>

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(日本製鉄)



■ 研究開発の最終目標

・評価方法の確立と省エネ効果(目標10%)の確認。

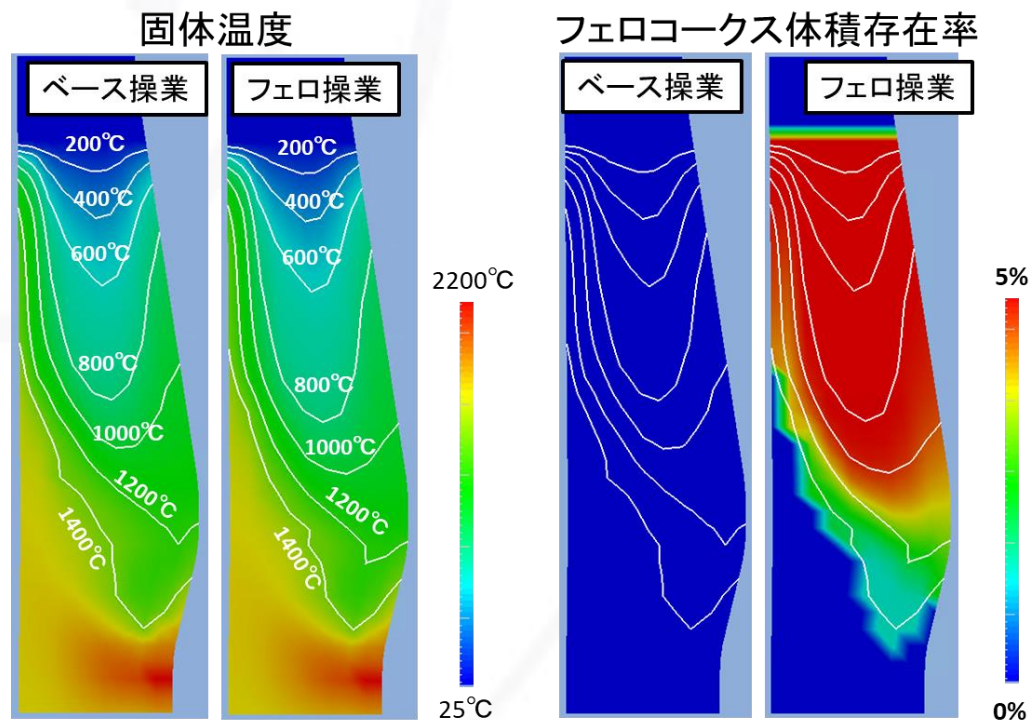
⑤-1の数値シミュレーションと③(実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証)の結果と合わせ、目標の**製鉄プロセスにおける省エネ10%を検証**する。

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(日本製鉄)

■ 成果

■ 福山3高炉フェロコークス操業試験の解析



- ⑤-2で得られたフェロコークスガス化速度式を⑤-1で開発した汎用高機能高炉内反応シミュレータに適用し、2022年10月に実施した福山3高炉フェロコークス操業試験を解析した。
- モデル解析結果は、福山3高炉の操業実績(熱保存帯温度変化、ガス利用率変化、圧力損失変化等)と精度よく対応していることを確認した。

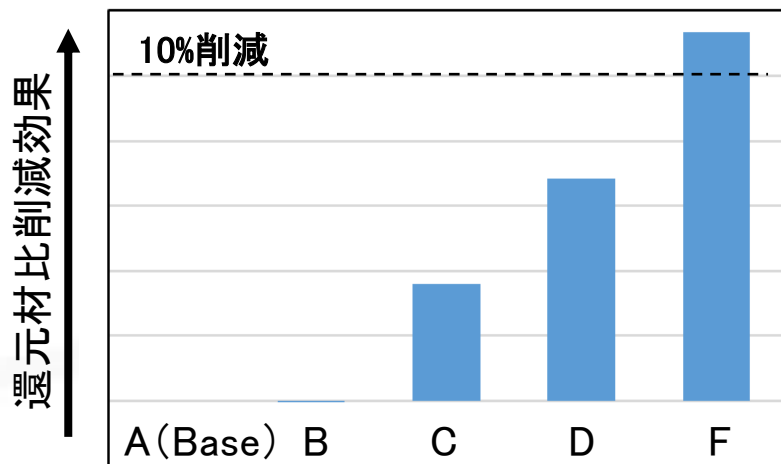
汎用高機能高炉内反応シミュレータの精度が確認でき、**フェロコークス導入時の評価方法を確立した。**

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(日本製鉄)

■ 成果

■ フェロコークス多量使用操業のFS検討と省エネポテンシャルの検証



A: 基準操業 (Base)

B: フェロコークス多量使用

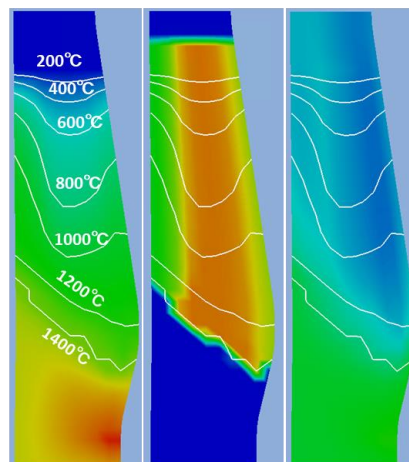
C: フェロコークス多量使用 + 高RI

D: フェロコークス多量使用 + 高RI + 操業適正化 (細粒焼結鉱利用、分布調整等)

F: フェロコークス多量使用 + 高RI + 炉頂ガス循環 + 操業適正化 (細粒焼結鉱利用、分布調整等)

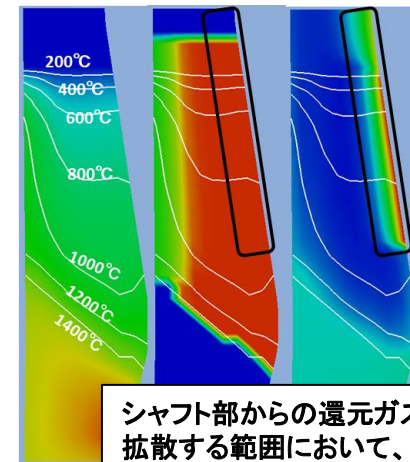
A (基準操業)

固体温度 鉱石存在率 N2濃度分布



F (還元材比11%削減)

固体温度 鉱石存在率 N2濃度分布



シャフト部からの還元ガスが拡散する範囲において、分布を適正化することで還元材比が更に改善

フェロコークス多量使用時の課題となる鉱石還元速度上昇に対して様々な対策(高RI化、細粒焼結利用、炉頂ガス循環、装入物分布適正化等)を実施することで、還元材比11%の削減が可能となり、国プロ目標である製鉄工程省エネ10%削減、製鉄所全体での省エネ、製鉄所全体でのCO₂削減の全てを達成できる可能性があることを見出した。

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(九州大学)

■ 研究開発の最終目標

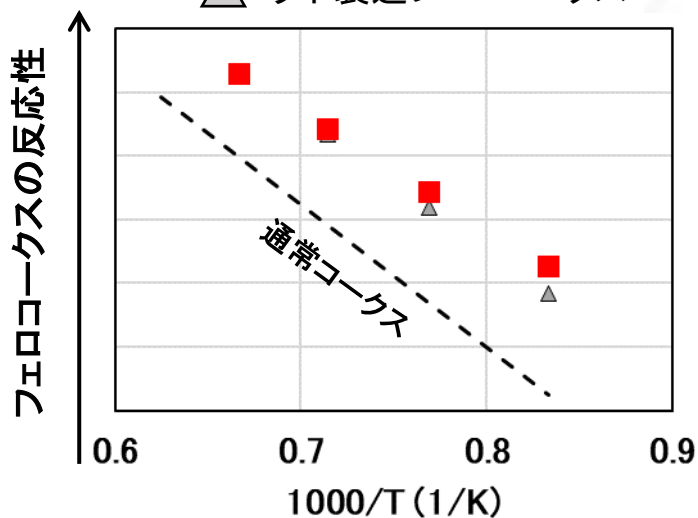
- ・中規模設備で製造したフェロコークスの反応速度を調査し、反応モデルを構築する。

■ 成果

- 熱天秤試験における中規模製造設備フェロコークスのガス化率の温度依存性

中規模設備で製造したフェロコークスの反応性は、ラボ製造したフェロコークスの反応性とほぼ同じであり、通常コークスと比べて高い反応性を示すことを確認。

反応性大
■ 中規模設備製造フェロコークス
▲ ラボ製造フェロコークス



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。

FIN