

**研究評価委員会**  
**「環境調和型プロセス技術の開発／②フェロコークス技術の開発」(中間評価)分科会**  
**議事録及び書面による質疑応答**

日 時：2020年11月17日(火) 13:00～17:27

場 所：NEDO川崎 2301～2303会議室(オンラインあり)

出席者(敬称略、順不同) ※リモート参加

<分科会委員>

分科会長	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	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	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 ※
委員	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 ※
委員	角田 雄亮	日本大学 理工学部 物質応用化学科	准教授
委員	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 ※
委員	成田 暢彦	愛知学院大学 総合政策学部	非常勤講師 ※

<推進部署>

吉岡 恒	NEDO	省エネルギー部	部長
田村 順一 (PM)	NEDO	省エネルギー部	特定分野専門職
矢島 康徳	NEDO	省エネルギー部	統括主幹
武田 行生	NEDO	省エネルギー部	特定分野専門職
山本 良美	NEDO	省エネルギー部	主査

<実施者>

佐藤 道貴(技術開発責任者)	JFE スチール株式会社	スチール研究所	主席研究員
庵屋敷 孝思	JFE スチール株式会社	スチール研究所 製鉄研究部	フェロコークスグループ グループリーダー
拜司 裕久	JFE スチール株式会社	技術企画部	主任部員
小柳 保章	JFE スチール株式会社	西日本製鉄所(福山地区)	コークス部 フェロコークスプロジェクト推進班 班長 ※
宍戸 貴洋	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	主任研究員
安室 元晴	株式会社神戸製鋼所	開発企画部	次長 ※
白石 恒司	株式会社神戸製鋼所	鉄鋼アルミ事業部門 技術企画部 企画グループ	主任部員 ※
菊池 直樹	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	室長 ※
奥山 憲幸	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	上席研究員 ※
堺 康爾	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	主任研究員 ※
和田 祥平	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	※
小堀 竜一	株式会社神戸製鋼所	技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室	※
酒井 博	日本製鉄株式会社	技術開発本部 プロセス研究所 製鉄研究部	主任研究員

<評価事務局>

森嶋 誠治	NEDO	評価部	部長
塩入 さやか	NEDO	評価部	主査
後藤 功一	NEDO	評価部	主査
鈴木 貴也	NEDO	評価部	主査
木村 秀樹	NEDO	評価部	専門調査員
植山 正基	NEDO	評価部	特定分野専門職

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 a) 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント
  - b) 研究開発成果、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し
  - 5.2 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
  - 6.1 プロジェクト全体
  - (6.2と6.3と6.4はまとめて説明と質疑応答)
  - 6.2 フェロコークス製造中規模設備での製造技術実証
  - 6.3 一般炭、低品位原料使用時の製造技術
  - 6.4 実高炉でのフェロコークス長期使用、効果検証  
(休憩)
  - 6.5 新バインダー強度発現実証
  - 6.6 フェロコークス導入効果の検証
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

## 議事内容

(公開セッション)

1. 開会、分資料の確認
  - ・開会宣言 (評価事務局)
  - ・配布資料確認 (評価事務局)
2. 分科会の設置について
  - ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。
  - ・出席者の紹介 (分科会委員、推進部署、評価事務局)
3. 分科会の公開について
  - 評価事務局より、既に資料2及び3に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。議題6.「プロジェクトの詳細説明」、議題7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。
4. 評価の実施方法について
  - 評価事務局より、既に資料4-1~4-5に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 a) 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント
  - b) 研究開発成果、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し
    - 評価事務局より、既に資料5に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。実施済みの質疑応答も踏まえて、その内容について質疑応答が行われた。
  - 5.2 質疑応答

**【河瀬分科会長】** 分かりました。それでは、事前にやり取りをした質疑応答も踏まえ、ご意見、ご質問等をお願いします。ここでプレゼンテーションがなく、質疑応答というのは少しやりにくい感じはしますが、委員の皆さま、いかがでしょうか。

では、私が口火を切らせていただいてよろしいですか。これは事前質問でもお伺いしたのですが、今回、実証のステージということで、スケールが非常に気になっています。実機で高炉が一つあたり、1500 t/d のフェロコークスを供給したいということです。今回、300 t/d の機械を5台並べて使うので、300 t/d のフェロコークス製造設備で実施すれば、それが実証になるという理解でよろしいですか。

**【田村 PM】** そういう理解で結構です。

**【河瀬分科会長】** そこは構わないですけれども、フェロコークスの高炉への装入試験が100 t/d というスケールで設定されていることについて、私は不思議に思っています。15台並んでいるわけではないと思います。この差はどう考えればよろしいですか。

**【田村 PM】** 田村から答えます。100 t/d というのは、本年度のフェロコークスの投入量です。来年度が200 tで、2022年度の最終年度が300 tになっています。狙っているのが最終年度での300 tというところでございます。最初から300 tを投入すると、高炉への影響など、非常にリスクがあります。量的には3分の1の100 tから順次上げていきます。その状況を確認しつつ、最終的な目標の300 tまで上げていきます。300 tの場合ですと、実際の製造能力と高炉にそれを連続装入していくというところに

つながっていきますので、そういう形で、今回の実証を進めていくということになっています。

【河瀬分科会長】 ありがとうございます。残りの期間で増やしていかれるということでしょうか。

【田村 PM】 そうです。

【河瀬分科会長】 それでも 1500 t/d でないのは、なぜですか。

【田村 PM】 1500 t/d というのは、最終的な事業化になったときに、300 t の設備を 5 台並べて、それで 1500 t にもっていくということです。最終的には、そういったことで、事業化に向けて進めていくということになると思います。

【河瀬分科会長】 納得いたしました。それと関連して、バインダーの話があります。現状はアスファルト等の既存のバインダーを使っているわけですが、足りなくなるおそれがあるので、新しいバインダーを開発するというのを伺いました。今後、実証ステージの最終段階でも、量産は難しいのではないかという見通しだと理解しましたが、それは正しいですか。

【田村 PM】 今回の事業の中で、バインダーの開発としては、高炉内できちんとフェロコークスの強度が出るかなど、特性の評価を行いながら、最終的な製造条件も確立するところまでは進めることになっています。この事業が終了後に、実際の量産設備を作りつつ、そこで展開し、量産に結び付けていくということになっています。

【河瀬分科会長】 端的に伺うと、アスファルトでも取りあえず量は足りているということですか。

【田村 PM】 そういう意味では、今回の実証で行うフェロコークスの製造量に対しては、問題がないと考えています。最終的に、事業化になって、フェロコークスの量が非常に増えるという場合に、不足するという懸念があるので、現在の段階から準備をしていくということになります。

【河瀬分科会長】 納得いたしました。ありがとうございます。

他の委員の皆さま、いかがでしょうか。

【菅原会長代理】 秋田大学の菅原です。河瀬先生、よろしいでしょうか。

【河瀬分科会長】 よろしくお願ひします。

【菅原会長代理】 全体のことで漠然とした質問になるかもしれませんが、フェロコークス技術の開発は、2030年までに事業化の達成となっています。今の時代の流れを考えると、もう少し加速的に行うことは可能でしょうか。どなたに質問したらいいのでしょうか。NEDOの方なのか、あるいは実施者の方なのかということがありますが、いかがでしょうか。

【田村 PM】 まず、NEDO からお答えさせていただきます。2030年においては、実機規模で最大 5 基ということが目標になっています。実際のフェロコークスの活用がスタートするのは、本事業が終わった後になりますので、2030年にならないうちに、そのうちの 1 基、2 基という展開ができると思っています。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。少し補足させていただきますと、本事業で行っている 300 t/d のプラントは 2022 年まで、本事業で製造プロセスなどを検証してまいります。その過程で、省エネ効果や経済効果が非常に良いと判断された場合には、2024 年以降になるかと思いますが、このプラントをそのまま実機化して、商用設備 1 号機として使っていきたいと考えております。その後は、個別会社の事情や環境変化も考慮しつつ、2030 年までには 2 号機、3 号機と台数を増やしていこうという考えです。

【菅原会長代理】 ありがとうございます。

【河瀬分科会長】 段階的に導入していけるというのが、このプロジェクトの良い点ではないかと私は思っています。他にはいかがでしょうか。

【篠竹委員】 篠竹ですが、よろしいでしょうか。

【河瀬分科会長】 お願いいたします。

【篠竹委員】 資料5で、事前に質問したことについて、回答がありました。それについて、質問をします。回答に非公開内容が入っていますけれども、ここで質問してよろしいですか。

【河瀬分科会長】 ここでお答えいただけるものだけは、回答があると思います。続きは後ほど、ご回答いただければと思います。

【篠竹委員】 フェロコックスを使ったときのエネルギー低減についての質問です。資料の5ページ目です。事前に資料を見て、縦軸が理論的には70程度まで下がるということについて質問したときに、高炉に必要な炭素の量が回答に入っています。回答の中では、数字が書いてあります。これは現実の高炉とかなりかけ離れた、多めの仮定の数字になっています。そこをベースにすると、当然、減ります。今、その数字ではないので、このようなところまで下がるのではないのでしょうか。その仮定が変なのではないかと思いましたが、いかがでしょうか。

【河瀬分科会長】 いかがでしょうか。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。70%という数字は、理論的な還元材比下限値と現状の高炉の還元材比の比でございまして、非公開資料には事前質問への回答として根拠を示しています。理論的な還元材比下限は、速度論的な効果を全く考慮しない、平衡論的な限界だけに基づいたものです。その値は仰るように現実的ではありませんが、目安として70%程度としております。現実の高炉では、そこまでは到達できないと認識しています。

【篠竹委員】 分かりました。平衡論といっても、これは間接還元で、COがどれだけ還元に寄与するかということ。全部、間接還元の設定にして、平衡論で行っているので今の数字と合わないということは理解しました。

すみません。もう一つ、エネルギー低減に関係する部分で、確認したいと思います。フェロコックス自体に、もう既に還元された鉄が入っているわけです。鉄鉱石を使って、フェロコックスのある所でも還元されて鉄になっているということです。それは、高炉に入れたときに還元される必要がなく、鉄として出てくるので、その鉄を溶銑としてカウントして考えたら、当然、減るわけです。その部分がどのくらいあるのかということが、疑問です。フェロコックスを作る所で還元をされているから、還元材比が減るといふ部分と、フェロコックスを使うことによって純粋に効率が良くなっているという部分が、それぞれどの程度あるかという部分が疑問です。いかがでしょうか。

【河瀬分科会長】 数字はお持ちでしょうか。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。フェロコックスの中に、30%の鉄鉱石由来の還元鉄が入っておりまして、残りの70%がコークスでございまして。還元材比を検討するに際しては、もともと還元された鉄が炉頂から入ってきますので、装入物の酸化度は低い値となります。さらに、残り70%のコークスは反応性が高いので、高炉の熱保存帯温度を下げる効果が出てまいります。これら両方の効果、すなわち、熱保存帯が下がって、還元平衡点W点が高酸化度側である右側に移動する効果と、装入物の酸化度が下がって、W点が下方に移動する効果の二つの効果により還元材比が下がると考えています。

【篠竹委員】 ありがとうございます。合計で例えば 10 %減るということは分かります。その内訳を知りたいということです。

【佐藤技術開発責任者】 10 %を実現するためのフェロコークスの原単位というのが、最大 150 kg ぐらいです。鉄分としては、その 3 分の 1、すなわち最大 50 kg 程度が入ってまいります。その効果としては、即答はできないのですが、最大で 50 kg 分の鉄の効果とお考えください。

【篠竹委員】 ありがとうございます。

【河瀬分科会長】 ありがとうございます。他の質問はいかがでしょうか。

【尾崎委員】 すみません。群馬大学の尾崎です。

【河瀬分科会長】 尾崎先生、お願いします。

【尾崎委員】 2050 年までにゼロエミッションということが言われています。今回のこの技術、それから COURSE50 の技術のゼロエミッションに占める位置はどのようになりますか。基本的なことで申し訳ありませんが、教えていただけますか。

【田村 PM】 NEDO の田村です。お手元の資料 5-1 に革新的環境イノベーション戦略という資料も入っていると思います。そこで示されているのが、大きく二つあります。一つは 2050 年以降の早い時期にということで、水素還元ゼロカーボン・スチールの話があります。もう一つは、COURSE50 とフェロコークスの技術を併せまして、CO<sub>2</sub> の削減を加速していくということがあります。ゼロカーボン・スチールにつきましては、開発が始まったところです。COURSE50 やフェロコークスの技術を併せることで、2050 年に向けた CO<sub>2</sub> の削減につなげていくことになると思います。技術的には、当初 80 %といわれていたものが 0 ということになるとすると、加速をしていかざるを得ないという印象です。

【尾崎委員】 フェロコークスを使ったとしても、CO<sub>2</sub> が出てきます。CO<sub>2</sub> 排出量の低減には排出権取引も考えられるでしょうが、本当に技術的にゼロエミッションや脱炭素を進めていくとなると、根本的に CO<sub>2</sub> を排出する技術であるフェロコークスによる鉄鉱石の還元では、どのようにこれを実現していくのでしょうか。将来的には水素還元に行くのでしょうか。教えていただけますか。

【田村 PM】 そういう意味では、二つの流れというのは変ですけども、ゼロカーボンを使っていく方向と、出てきたカーボンを例えば、今、進めているような CCU や貯留で解消していく、出ないようにしていくという方向を並行して進んでいくのではないかと考えています。

【尾崎委員】 基礎的な部分をもう少しお聞きしてよろしいでしょうか。今回の製鉄技術では高炉法を使用していますが、スクラップを再利用する電炉法とは製造する鉄のスケール感が全く違いますか。自然エネルギーを利用した電炉法を使用すると、CO<sub>2</sub> 排出量が抑えられると思うのですが、そういう方向も狙っているのでしょうか。

【田村 PM】 電炉は高炉に比べて、CO<sub>2</sub> の発生量は t 当たり、高炉が 1.9t に対して、その 25 %程度だと言われています。

【尾崎委員】 25 %ですか。

【田村 PM】 4 分の 1 程度だと言われています。最終的に、2100 年というのは少し遠いですが、いろいろな調査で見ると、電炉も大きくなってくるものの、溶銑、鉄を作る所がないとスクラップも出てなくなるということがあります。そういう意味では、電炉が増えるにしても、両方の技術は必要になってくるということだと思います。

【尾崎委員】 つまり、溶銑という鉄鉱石を還元するプロセスが必要になってくるということでしょうか。

【田村 PM】 そうです。カーボンを使っていくのか、今いわれているような水素を使っていくのか、そういった違いは出てくると思います。しかし、溶銑を作り出すところは必要になると考えていますし、そういった方向かと思います。

【尾崎委員】 CO<sub>2</sub>を発生する鉄鉱石を還元するプロセスを海外で行うという問題ではなくて、海外でも日本の低CO<sub>2</sub>技術を使って、取り組んでいくということですか。

【田村 PM】 そのとおりで、CO<sub>2</sub>を発生するプロセスを海外で行うという問題ではなく、国内でもCO<sub>2</sub>削減をするし、海外でもCO<sub>2</sub>の出ないような方法を探っていくということだと思います。

【尾崎委員】 どうもありがとうございました。基礎的なことをお聞きして申し訳ありません。

【河瀬分科会長】 ありがとうございました。他はいかがでしょうか。角田先生、お願いします。

【角田委員】 日本大学の角田です。資料5-1のスライド19の実施効果についてお聞きします。本プロジェクトの開発費の総額が200億円、NEDO助成額が100億円ということです。非常に大きな金額が掛かっております。アウトカムのところ、2030年頃までに5基導入を想定しているとなっています。このプロジェクトはJFE様と神戸製鋼様と日本製鉄様、3社共同で実施されていると思います。このアウトカムに対して、3社の役割はどのようになっていますか。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。本プロジェクトでは、3社共同で技術の開発を行っています。このプロジェクトの中において、このプロセスが経済的に成り立つのか、あるいはCO<sub>2</sub>削減や省エネの観点から有効な技術なのかを明確にいたします。その後、実機化するかどうかという判断をしなければなりません。その場合、各社によって原料事情や設置する場合のインフラ、ユーティリティなども違いますので、当然、経済性評価も異なってきます。そういったことも含めて、この技術の評価を各社で実施して、実機化するかどうかを判断していきます。2030年までに5基と書いてありますが、共同で取り組むわけではなく、各社で導入を検討していくというスタンスです。

【角田委員】 分かりました。

それでは、次の質問をさせていただきたいと思います。資料5-2の29番目のスライドです。今回、実際には溶銑1t当たり150kg程度が実用的には想定されるということです。実際には45kg以上と書いてありますけれども、45kgを実炉では装填されるということで、少し開きがあります。その部分をシミュレーションで埋めていくということだとは思いますが、シミュレーションの幅が大きいのではないかと思います。45kg以上という幅は広がるということはある得ますか。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。45kgという数字は、実は300t/dのプラントの仕様上、フェロコックスを高炉に送れる限界値です。今回の設備ではホッパー容量など、設備的な制約がございまして、45kg以上、フェロコックスを貯留し、切り出す能力がないということです。ご指摘のように、150kgまでにはまだ遠い数字となりますが、設備の限界まで高炉に入れてみようという計画です。少なくとも30kgに加えて45kgの点を1つ増やすことによって、シミュレーションの精度を少しでも上げたいと考えております。

【角田委員】 分かりました。ありがとうございます。

もう1点だけ、よろしいでしょうか。資料5-1のスライド33番、研究開発進捗管理のところについてです。技術委員の先生方からコメントをいただいた事例が出ています。こういった大学の要望などを研究に反映していただきたいということに対して、こういった取組をされているかを確認したいと思えます。

【佐藤技術開発責任者】 そのコメントにつきましては、実は 6-1 の資料で非公開の中で、私から詳しく説明させていただく予定にしています。

【角田委員】 分かりました。ありがとうございました。

【河瀬分科会長】 では、非公開セッションのほうで、よろしくお願ひします。まだ、5分、10分程度は続けられます。せっかくですから、あと2人の委員からもご質問をいただきたいと思ひます。奥村先生、いかがでしょうか。

【奥村委員】 現在、高炉で使われているような石炭や鉍石より、低品位のものが使えるということになります。その理由を端的に教えていただきたいと思ひます。

【庵屋敷グループリーダー】 JEF スチールの庵屋敷でございます。低品位というのは、一般的に石炭の名称というわけではありません。コークス炉で使用される石炭は、原料炭と呼ばれています。原料炭のように、加熱したときに溶融するような品位の良い石炭ではなく、非常に溶融性が低くて、コークス炉のように石炭を炉頂から自重落下させて、側壁からの輻射加熱で溶かすという手法ですと、なかなかコークス化しにくい石炭を低品位と呼んでおります。フェロコークスのように双状ロールで圧力をかけて成型いたしますと、非常に粒子どうしの距離が隣接しますので、加熱したときに僅かな軟化・溶融で成型物が得られるということです。圧密することによって、比較的low品位の石炭が使えるということです。

【奥村委員】 その場合に、バインダーが必要になります。バインダーも含めてということで、よろしいですか。

【庵屋敷グループリーダー】 フェロコークスでは、バインダーを2種類使っております。液体のソフトオイルピッチ SOP と固形のアスファルトピッチ ASP を使っています。SOP は、成型時に効果を発揮するバインダーです。一方、ASP は乾留した際、SOP よりも固形炭素が多く残りますので、乾留時にカーボンのネットワークを形成いたします。

【奥村委員】 それと、石灰というのはフェロコークスを作るときには、加える場合もあるということですか。

【庵屋敷グループリーダー】 すみません。今、聞き逃してしまいました。石灰でしょうか。

【奥村委員】 石灰を加えて、フェロコークスを作るといふこともありますか。

【庵屋敷グループリーダー】 焼結では、凝結剤として石灰を使用いたしますが、フェロコークスでは、石灰は使用していません。

【奥村委員】 分かりました。

【河瀬分科会長】 成田先生、いかがでしょうか。

【成田委員】 成田でございます。5-1 の資料のスライドナンバー12 です。12 番の中で、石炭使用量をベースライン100 として記載していただいています。コークス比の数字がベースラインから、今回の開発でどのように変更になったかということをも具体的な数字で教えていただけるならお願ひしたいです。

【佐藤技術開発責任者】 JFE スチールの佐藤でございます。まずベースラインについては、一般的な製鉄所で、製鉄工程に原料炭、一般炭が入ってまいりまして、溶銑1t 当たり、大体 650 から 700 kg の範囲だと思われまふ。

【成田委員】 コークス比ではいかがでしょうか。

【佐藤技術開発責任者】 高炉のコークス比という意味でよろしいでしょうか。



【成田委員】 それで結構です。

【佐藤技術開発責任者】 コークス比はベースラインで 350 kg/t 溶銑ぐらいが平均値だと思います。

【成田委員】 フェロコークスが高炉に使用されたときの値をどう定義するかということがあります。コークスをどう定義するかは難しいかということがあります。オレンジ色のところだけでどの程度、先ほど篠竹委員も質問したように思いますけれども、フェロコークスだけのコークスでどの程度かを教えていただけますか。

【佐藤技術開発責任者】 この棒グラフの中にコークス用の石炭と書いてありますが、オレンジ色で塗っていると原料炭といって、先ほどございましたように高品位の粘結性のある石炭であり、大体 8 割です。残りは、あまり粘結性を持たない低品位炭ということになります。フェロコークスにつきましては、原料炭は 0 で、一般炭だけを使うという計算にしております。フェロコークスを使用した場合、コークス炉用の石炭量は 78 から 50 程度になりますので、従来のコークス比は 3 分の 2 程度になるというイメージかと思います。

【成田委員】 分かりました。どうもありがとうございました。

【河瀬分科会長】 ありがとうございました。予定の時間を過ぎましたので、次の議題に移りたいと思います。

(非公開セッション)

#### 6. プロジェクトの詳細説明

省略

#### 7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

#### 8. まとめ・講評

【河瀬分科会長】 議題 8 は、まとめ・講評です。成田委員から始めて、最後に私という順序で講評をいたします。それでは、成田委員、お願いいたします。

【成田委員】 成田でございます。今日、聞かせていただき、私は主に製鉄所システム全体のエネルギー消費という観点から見させていただきました。個別の質問もさせていただきました。その中で、フェロコークスの技術でかなり大きな CO<sub>2</sub> 排出削減能力、ポテンシャルがあるということが分かりました。製鉄所全体として見たときに、下工程のエネルギー消費量の補填をしなければならないということがあります。フェロコークス技術の開発によって得られた CO<sub>2</sub> 排出量削減がかなり下工程で補填しなければならないということがよく分かりました。下工程で、どんなエネルギーを使ったかということを再検討していただければと思います。また、COURSE50 で水素がかなり使われるということになると、またこれも下工程のエネルギーバランスにかなり影響を及ぼします。下工程のエネルギーのあり方についても、今後、検討していただければありがたいと考えました。今日はどうもありがとうございました。以上でございます。

【河瀬分科会長】 ありがとうございました。続きまして、篠竹委員、お願いします。

【篠竹委員】 篠竹です。今日、いろいろ聞かせていただき、フェロコークスの製造については随分要素

技術を開発して、技術がかなり作られてきていると感じました。高炉で使用して省エネする、CO<sub>2</sub>を減らすということについては、目標はありますけれども、これから検証していく段階だということを理解しました。テストとしては、かなり少ない量を使って評価しますので、多く使ったときにきちんと効果が得られるかを評価できるように進めていただきたいと思います。

それから、開発時期についてです。今、2050年に温室効果ガスをゼロにするという、世界がそういう流れになってきてしまっています。石炭を使って効率を上げるということが、世の中に次第に認められなくなってきたということがあります。フェロコックスについては、かなり短期的に開発して、すぐ使えるようにして、COURSE50は実現はもう少し後ですけども、2050年にゼロカーボンにはできません。高炉で鉄を作るのにはカーボンが必要です。そこを水素に変えられるだけ変える、CCUS等も活用して、できるだけCO<sub>2</sub>を出さないということがあります。その先の本当にゼロカーボンスチールとなると、高炉ではなくて水素還元炉と電気炉という組み合わせになるのかも知れません。いつ、何を実施するかということがあります。

それから、製鉄に関しては、日本の問題ではなくて、中国とインドを何とかしないと地球環境問題が解決しないと思います。そういう所にうまく技術をサプライしていくことも見据えていただけたらと思っております。以上です。

**【河瀬分科会長】** ありがとうございます。では、角田委員、お願いいたします。

**【角田委員】** 日本大学の角田です。本プロジェクトは、300t/dの中規模設備の建設、安価な原料の使用拡大、省エネ効果10%の検証の中間評価となっています。中規模設備の建設と安価な原料を用いるという部分に関しては、非常によく検討されていて、いろいろとこちらから質問させていただきましたが、的確に答えていただけたと思っております。

途中で説明がありましたバインダーについては、新規のバインダーを添加して、強度が上がるということは捉えていらっしゃるようです。そちらの効果の検証も、もっと増やしていただきたいと思います。また、安価な原料を用いていますが、バインダーが取れる量が少なくなってしまうと、コストが上がるという懸念にもなります。ぜひ、バインダーの部分も含めて、事業化に向けて検討を続けていただきたいと思います。

また、この事業は日本だけではなく、海外展開ということもあるのではないかと思います。ぜひ、新しい技術に関しては、国外も含めて特許化を目指し、国外事業展開に向けた取組を推進していただきたいと思っております。以上です。

**【河瀬分科会長】** 角田先生、ありがとうございます。続きまして、尾崎委員、お願いいたします。

**【尾崎委員】** 群馬大学の尾崎です。今日はどうもありがとうございました。10年程度前でしょうか、コークスの人たちと会ったときに、「製鉄業というのは乾いた雑巾からさらに水を絞るように省エネ・高効率化をがんばっている」という話を聞きました。さらに今回の2050年で脱炭素化に向けて、取り組んでいるということで感銘を受けました。今回、突然、このような脱炭素化になって、300tから450tに加速していったレスポンスの良さにも感銘を受けております。

今日、鉄を鉄鉱石から還元するのに、高炉は必要だと勉強させていただきました。今回の脱炭素化には、高炉を使っていくということも重要だということも理解しました。

私は材料が専門ですけども、材料の面からもバインダーの役割について、いろいろ明快にご説明いただきました。

冷間強度ということで、コークスは高炉の中で、気体、液体を通していくという構造材料としての役割もあり、ガス化が進んでも、その構造を保っていかなければならないということがあります。そ

の辺りの評価が検討課題として残っていると思います。さらに、今回の組成や作り方、粒子の分布、実際の高炉の中でのコークスの挙動などが推測できれば面白いということをおもいました。今日は本当にどうもありがとうございました。以上です。

【河瀬分科会長】 尾崎先生、ありがとうございました。次に奥村委員、お願いいたします。

【奥村委員】 名工大の奥村です。本日はどうもありがとうございました。お話をお伺いして、実操業に向けて着実に技術開発が進んでいることを感じました。各要素研究について、いろいろと説明がありましたけれども、新しい技術開発に取り組まれたということでした。実験とシミュレーションを実施されていますけれども、取りあえず実験を行ってみて、その結果を解釈されています。先ほどのお話を伺っていて、高温時の強度も AI や機械学習といったものを活用することによって、低温の条件からも精度よく予測できるようにできればいいのではないかと感じました。

COURSE50 との相乗効果を今後、期待したいと思います。もう少しスピード感があってもいいのではないかと感じました。将来的にはこの技術が日本のトップ技術として、海外にも転用していければと思います。以上です。

【河瀬分科会長】 奥村委員、ありがとうございました。続きまして、菅原分科会長代理、お願いいたします。

【菅原分科会長代理】 秋田大学の菅原です。今、鉄鋼業に対して、地球温暖化対策としての二酸化炭素発生の低減、さらにコークス用粘結炭の一部代替、または国際競争力を増すための省エネ技術の促進といったことが求められていると思います。これらの要求を満たす新しい先進技術も必要だという背景はよく分かりました。最近、首相の菅さんが 2050 年までに温室効果ガス排出量を実質 0 にするという所信表明を出しました。地元、秋田出身の首相ですので、応援したいと思っていますが、それとはともかく、本事業の目的は、非常に重要であり、実現性も高いので、この事業を加速するという方策を検討したほうがいいのではないかと考えております。

現在、コロナ対策もあって、なかなか事業の進め方にご苦労をされていると思います。ぜひ、今後の研究が進むよう、皆さまのご活躍を祈念しております。どうもありがとうございました。

【河瀬分科会長】 菅原先生、ありがとうございました。最後に私から、改めまして、京都大学の河瀬です。皆さま、本日は半日間、どうもお疲れ様でした。

世界で最も省エネルギーの進んだ日本の製鉄所に、さらなる省エネを進めなさいというなかなか難しいことであるわけです。先行の二つのプロジェクトを無事に達成されて、最後に実証のプロジェクトに入っているということで、大変興味深く、今日はお話を伺いました。着実な計画を組まれて、実現に向けて進んでいると実感しました。

今日、私は実証事業という観点に気を付けてお話を伺うようにしていました。フェロコークスを作る部分については、実機に転用できる設備を作られましたし、運転もうまくいっているようです。高炉に入れて、実際にどうかという部分については、これからスケールを大きくしていくというお話でしたので、今日の段階では、これで実現できると言っはいけないのではないかと思います。残りの時間で、着実に実証していただけたらと思っています。

実際に進めるようになると、石炭については市況に応じて入ってくるものが変わりますので、同じようにフェロコークスに使えるか、その都度、試験していくというのも大変かと思ひます。広い炭種に対応することについての方針もとっておかれたほうがいいのではないかと思ひます。

高炉については、コークスの還元剤としての役割、スパーサーとしての役割の二つを考えたときに、直接還元あるいはCOを経由しての間接還元について、それなりに調べておられると思っています。スパーサーとしての役割については、特に項目を立ててやっておられるようにも思えませんでした。冷間強度が確保できればそれで良いというご経験をもしかするとお持ちかもしれないので、私には分からない部分です。実際に進めようというときには、スパーサーとしての役割もどうなるかということをご検討いただけるとよいのではないかと思います。

もちろん、こういう技術開発は、上流の部分からできあがっていくものだと思います。フェロコークス製造の部分が先にできあがってきているのは当然かと思っています。途中でも申し上げましたけれども、このプロジェクトは、突然新しい技術に切り替えるというものではありません。少しずつ、フェロコークスを使う量を増やしていくという進め方が可能な技術です。準備が整った部分から、実際に使っていただくという進め方ができると思います。ぜひ、積極的に進めていただきたいと思います。

最後に、大学と企業との連携について、過去にも技術委員から指摘がございました。今日、お話を伺っていて、分散して行っているとはまでは思いませんでした。きちんと関係があるテーマを設定されて、大学での成果を実際のプロジェクトに反映されているように思いました。このプロジェクトが始まってから、同時に大学での研究が始まったのではないのでしょうか。先に数値シミュレーションなどが終わってれば、徐々に活用できるのかもしれませんが、同時進行しているので、まだ十分にその成果を組み入れられていない点もあるのではないかと思います。以上が私の講評になります。

**【後藤主査】** ありがとうございます。推進部部長および佐藤技術開発責任者から、一言ございますでしょうか。

**【佐藤技術開発責任者】** JFE スチールの佐藤でございます。いろいろためになるコメントを本当にありがとうございました。いただいているコメントを事業に反映して、なるべく前倒しでうまく進めるような方策も考えながら、皆で協力して取り組んでいきたいと思っております。ありがとうございました。

**【吉岡部長】** 省エネ部長、吉岡でございます。本日はどうもありがとうございました。われわれ、この技術に非常に期待をもって取り組んでおります。省エネ10%、CO<sub>2</sub>約10%弱ということですが、先ほどのご議論にありましたように、下工程のCOGの補填の仕方によっては、もっと強気もあり得るという話もあります。鉄鋼は国全体で15%の排出量がありますので、非常にインパクトのある数字だと思っております。大変期待して見えています。今回、いろいろと議論をいただきまして、より社会実装に向けてスピード感を持って、段階的に導入できるという点も踏まえ、海外展開も視野において、残り2年数カ月の実証を着実に実施してもらいたいと思います。引き続き、ご指導、ご鞭撻のほど、よろしく申し上げます。本日はどうもありがとうございました。

**【河瀬分科会長】** それでは、以上で議題8を終了します。

9. 今後の予定

10. 閉会

## 配布資料

- 資料1 研究評価委員会分科会の設置について
- 資料2 研究評価委員会分科会の公開について
- 資料3 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
- 資料4-1 NEDOにおける研究評価について
- 資料4-2 評価項目・評価基準
- 資料4-3 評点法の実施について
- 資料4-4 評価コメント及び評点票
- 資料4-5 評価報告書の構成について
- 資料5 プロジェクトの概要説明資料（公開）
- 資料6 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
- 資料7 事業原簿（公開）
- 資料8 評価スケジュール

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答	委員氏名
資料 7, p. 53	連続式の乾留装置では、タールトラブルの際の損失が大きいと考えられるが、回分式の場合よりガス処理設備の強化が必要か。	ご指摘の通り、石炭は乾留に伴いタールが発生致します。タールデカンタには、安水、タールのみならず、乾留時に発生するコークス粉も一部はタールミストに伴われタールデカンタへと送り込まれます。この同伴されるコークス粉の量によっては、デカンタでのタール、安水、コークス粉（滓）の分離が困難となります。そのようなことにならないように成型が重要な工程（高歩留まりで強度を維持）となります。今回のプラントにおいて回分式は設置しておりませんが、分離された安水は、製鉄所内の回分式設備に送り込まれます。	河瀬元明
資料 5-2, スライド 4, 14, 15 資料 6-3, スライド 6 資料 7, p. 55	課題②で低品位鉄鉱石 2 銘柄がフェロコークス製造に適用可能との結果を得ながら、1 銘柄のみを選定したのはなぜか。実用化の際に、1 銘柄で問題はないか。	今回の 300t/d のフェロコークス製造において 2 銘柄を適用可能との結果が得られておりますが、' 09 ~ ' 10 年度 NEDO、' 11 ~ ' 12 は国直轄で京浜で実施した「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」において既に 2 銘柄を適用可能としております。また、1 銘柄を使用しておりますが、その後の操業試験において別銘柄も使用する予定です。	河瀬元明
資料 5-2 スライド 8, 17	課題①で 300 t/d のフェロコークス製造を試験しながら、課題③では 100 t/d の高炉へ	短期での操業試験となりますが、300t/d での設備能力確認を行います。ただし、今年度は 100t/d での操	河瀬元明

資料 7 , p. 24, p. 56	の装入速度で試験を行っている。この差は何か。	業試験が主体となり、高炉での使用試験はその100t/dでの製造下となります。最終的な300t/dでの長期操業試験は2022年度となります。	
資料 5-1、p10	フェロコークス製造プロセスの中で、フェロコークス製造のための乾留で生成するタールはどのように利用されているのでしょうか。	フェロコークス製造プロセスでは、成型時に2種類のバインダーを使用しています。一つは石炭系のソフトオイルピッチ、もう一つは石油系のアスファルトピッチです。乾留で生成するタールは、タールデカンタで比重分離した後、遠心分離機で水分をさらに除去し、ソフトオイルピッチの代替としてリサイクルいたします。	菅原勝康
資料 5 - 1 p.4	円グラフから切り出した鉄鋼業のCO2排出量は14%の誤りではないでしょうか。	ご指摘の通りです。14%の誤記です。	奥村圭二
資料 5 - 2 p.22	冷間強度予測モデルは成型時のフェロコークスブリケットに対してですが、乾留後のフェロコークスの強度を予測するモデルが必要なのではないでしょうか。	本PJでは特に乾留前の成型物の機械的な衝撃による歩留まりの低下を防止するための定量的な冷間強度予測モデルの構築までをターゲットとしていません。乾留後の強度に関しては再委託先の東北大学のグループが当社とともに「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」(2009-2011年度NEDO)において、フェロコークスに関する研究を実施しており、乾留時の酸化鉄によるフェロコークスの強度劣化機構について、構造観察の観点から研究済となっています <sup>1-5)</sup> 。得られたフェロコークスの強度予測についても同グループがシミュレーションによる強度予測手法を確立しています。これらの知見	奥村圭二

		<p>を基盤に、本 PJ での新規な原料を用いるフェロコークスの強度予測は達成可能であると考えています。</p> <p>1) 酸化鉄の還元がハイパーコールを添加したフェロコークスの強度に及ぼす影響, 内田中, 山崎義昭, 松尾翔平, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 濱口眞基, 鉄と鋼, 105(10), 957-964 (2019)</p> <p>2) Effect of HPC (Hyper-coal) on Strength of Ferro-coke during Caking Temperature, Ataru Uchida, Yoshiaki Yamazaki, Shohei Matsuo, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Maki Hamaguchi, ISIJ International, 57(9), 1524-1530 (2017)</p> <p>3) Effect of Iron Ore Reduction on Ferro-coke Strength with Hypercoal Addition, Ataru UCHIDA, Yoshiaki YAMAZAKI, Shohei MATSUO, Yasuhiro SAITO, Yohsuke MATSUSHITA, Hideyuki AOKI and Maki HAMAGUCHI, ISIJ International, 56(12), 2132-2139 (2016)</p> <p>4) Evaluation of Thermoplastic Properties of Hyper-coal with added Iron Oxide in Thermoplastic Range, Ataru Uchida, Yoshiaki Yamazaki, Kenichi Hiraki, Tetsuya Kanai, Yasuhiro Saito, Hideyuki Aoki, Toshinori Inoue, Naoki Kikuchi, Nobuyuki Komatsu, Noriyuki Okuyama, Maki Hamaguchi, ISIJ International, 53(7), 1165-1171 (2013)</p> <p>5) 鉄鉱石の配合によるコークスの微視構造変化が鉄内装型コークスの引張強度に及ぼす影響山崎義昭, 林崎秀幸, 上岡健太, 平木健一, 松下洋介, 青木秀之, 三浦隆利, 鉄と鋼, 96(9), pp. 536-544 (2010)</p>	
資料 6 - 6	反応モデル中の Ef: 有効係数の物理的な意味	有効係数とは、細孔内の表面が反応に利用される度	奥村圭二



p.12	は何ですか。	合いを表しており、有効係数が 1 に近いほど細孔内の内部抵抗を無視できるような理想形の状態に近づきます。欄外に補足説明①を記載します。	
公開前半 P13	発表でもありましたが、インド、中国の技術が競合相手と理解しました。これらの技術は、開発技術とは全く異なる原理によるものなのでしょうか。これらの技術と比較したときの、本技術の長所・短所を教えてください。	<p>公開前半 p35 においてご説明しました海外技術開発動向調査で、競合技術として <b>HIsarna</b> と <b>Finex</b> を記載しています。</p> <p>この調査でインド、中国と記載していますのは、本事業終了後に、海外の市場としてフェロコークスの技術を展開できる可能性の高い国を示したものです。インド、中国は技術的な視点から見たものではなく、今後の鉄鋼生産量の伸び、また政策として省エネルギーに対するインセンティブが大きい、小型高炉の統廃合が進む、いずれの国も自国で石炭を産出しているにもかかわらず、原料炭、一般炭の輸入国であることから、展開できる市場の候補として上がったものです。</p> <p>インド、中国については競合となる技術はありません。</p> <p>今回競合技術として記載した技術について長所短所を記載します。</p> <p><b>HIsarna</b>  粉鉍石、微粉炭を用いた熔融還元法で、サイクロン型の予備還元炉で予備還元を行い、その後、鉄浴の</p>	尾崎純一

		<p>中で完全に溶融還元を行うものです。成功すればコークスや焼結が不要になります。現在、TATAがパイロットプラントで試験を実施中とのことですが、実機化に向けては技術難易度が高いとの調査結果です。</p> <p><b>Finex</b>  粉鉱石を直接使用します。流動層を用いて90%程度の高い還元率まで予備還元を行い、その後、還元粉をブリケットにした後、溶解炉に投入し、仕上還元を行うものです。韓国国内でPOSCOが実機稼働中です。</p> <p>上記と比較すると、高炉法は既に実用化されて高い生産性を有する製造方法です。</p>	
公開前半 P17	<p>表中の「2022年～2030年」という表記は開発期間でしょうか？2030年からCOURSE50に切り替わるということでしょうか。特に、「高炉改修不要」との記載を見ると、この技術は、寿命8年間の中継ぎの技術のようにも読めますのでお聞きしました。</p>	<p>公開資料5-2、P36～37にございますように、実用化・事業化の計画及びマイルストーンとして、本事業期間である「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号機として事業化を目指す。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」としてあります。</p> <p>よって、「2022年～2030年」という期間は事業化を推進して、国内で最大5基の実機導入を目指す期間という位置づけとなります。</p> <p>また、「高炉改修不要」の表現ですが、フェロコークス技術は、高炉の原料製造設備を導入するもので</p>	尾崎純一

		<p>すので、高炉本体の補修や改修は不要という意味です。</p> <p>一方、COURSE50は開発期間が長く、高炉改修も必要なことから、2030年～2050年（中長期）に実用化・事業化を目指すもので、フェロコークスからCOURSE50にスイッチする訳ではありません。2030年以降は両者が並列して存続することになります。</p>	
公開前半 P38	国内特許は対応されているとのことでした。これに対して国外特許数が少ないように見受けられます。海外展開を図るのに大丈夫なのか、と感じました。	特許に関しましては、06年先導研究開始以前に各社特許を出願しており、外国出願も行っております。	尾崎純一
公開後半 P26	シミュレーション結果にある「還元率」についてご教示ください。	高炉内の焼結鉱の還元率を示しています。カラーコンターの幅が、還元率0%～還元率100%に対応しています。	尾崎純一
資料 5-1 p.38	特許出願について、前段のプロジェクトにおいては多数出願されていますが、本プロジェクトでは少なくなっています。新規バインダーの検討など新たな知見もあると推察しますが、特許出願の予定はありますか。	公開資料 5-2、P33 に示しましたように、中規模設備固有のプロセス・設備、使用原料に関する特許は今後も継続して出願予定です。また、外国出願についても、海外展開の可能性が高い国（公開資料 5-2、P40～41 参照）に優先的に出願してきたいと考えます。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製造方法について特許出願を検討しています。	角田雄亮
資料 5-2 p.18	研究開発の中間目標にあるドラム強度について、データが無いようですが、本年度実施予定という理解でよろしいでしょうか。	現在、JFE スチールのラボ試験炉において、提示した条件で製造した新規固形バインダーを用いた評価試験を進めています（ドラム強度での評価）。	角田雄亮

資料 5-2 p.30	モデルパラメーターのチューニングとは何か、最終目標へどう繋がるのか説明してください。	離散要素法(DEM)において、粒子の機械的な物性値(ヤング率)などをそのまま用いるのではなく、粒子の運動で物理現象を精度良く再現できるように、真の物性値に修正(チューニング)を施して予測精度を向上させることを意味します。これは実際の粒子(石炭など)が不定形であるにもかかわらず、球形粒子として近似を行った上で計算行う際に、粒子同士の接触点の変形(モデルでは粒子同士の重なりとして反発力を算出します)をとっても、実際の粒子とは異なる挙動を示すと考えられます。このため、DEM では種々の応用計算例において、機械的物性値をそのままではなく、修正して用いるのが一般的となっています。	角田雄亮
5-1・p.11	金属鉄 30 重量%というのは、フェロコークス中の金属鉄の質量割合のことですか。もしそうだとするとずいぶん多いと思いますが、「フェロコークス比」と言ったときにその金属鉄の重量も含むのですか。	金属鉄 30 重量%と丸めていますが、厳密には鉄鉱石由来の部分還元鉱(還元率 85~90%、Fe/FeO/脈石成分の混合物)を 30mass%含むという意味です。フェロコークス比の定義は資料【5-2】P23 にありますように、フェロコークス中のコークス比/高炉全体のコークス比(-)であり、金属鉄は含みません。	篠竹昭彦
5-1・p.24	ピソライト中の結晶水は乾留炉で出ていくのでしょうか。	乾留時、高温羽口温度は 830~850℃の温度で 3 時間程度の滞留を考えております。ピソライトの結晶水の揮発には十分と考えております。ご参考までに、補足資料②に各種鉱石の結晶水の分解に関するデータ(TG-DTA)を示します。	篠竹昭彦

<p>資料 5-1 スライド 24</p>	<p>フェロコークス用の石炭品位の図で、縦軸と横軸の指標（または測定法）を簡潔に説明いただきたく。</p>	<p>縦軸は加熱時の石炭の流動性を示したもので、ギーセラープラストメーター法（JIS M8801-1973）で測定したものです。測定法は攪拌棒が挿入されている金属製のつぼに 425 <math>\mu\text{m}</math> 以下とした試料 5g を充填して所定の方法で圧縮し、このつぼを金属浴中にて 3.0°C/分で昇温、攪拌棒は 10mN・m のトルクに調整したクラッチに接続し、その回転数を 1 分間あたり 0.01 単位（ddpm）で測定した値です。これより石炭の軟化開始温度（攪拌棒の動き始め）、最高流動度温度、固化温度（攪拌棒が止まった時の温度）が判ります。横軸は、石炭の石炭化度を示したもので、反射率測定方法で測定したものです。測定方法は、850 <math>\mu\text{m}</math> に粉砕した石炭を常温硬化性、熱可塑性等の合成樹脂もしくは天然樹脂などを混合してブリケットを作成。これを油浸で倍率 100 倍で観察した時に表面に凹凸がないように研磨し対象試料とします。これを倍率 200 倍以上の偏向顕微鏡に光電子倍增管と最大透過波長 546<math>\pm</math>5nm のフィルム等を設置し、測定視野絞り 10 <math>\mu\text{m}</math> 以下でビトリニットと呼ばれる石炭組織の最大反射率を 1 個の試料につき 50 点以上測定し、標準試料との比較法により測定します。これらの値を平均したものが平均最大反射率となります。</p> <p>（補足資料③ 石炭の特性と試験方法をご参照ください）</p>	<p>成田暢彦</p>
---------------------------	---	--	-------------

		さい)  石炭の流動性は、石炭中に含まれる低分子物の量に比例するとともに低分子物の熱安定性が低いかあるいは比較的高温まで熱安定性が高いかと言った性状の差異に使われます。一般的に石炭化度が高いほど流動度曲線は高温側にずれ、最高流動度の高いものほど流動範囲が大きくなります。	
資料 5-1 スライド 26	(確認事項) ASP は石油系アスファルト、SOP は石炭系ピッチと理解して宜しいでしょうか？	その通りです。ASP は石油系アスファルトピッチ、SOP は石炭系のソフトオイルピッチです。	成田暢彦

質問票回答の補足資料① 「有効係数に関する補足説明」

従来、気固系反応の速度解析には未反応核モデルが用いられる。このモデルでは、反応の過程は、ガス境膜内拡散、生成物層内拡散、界面化学反応の 3 つに分類することができる。しかし、コークスなどの多孔質な固体反応物の場合、反応ガスは内部まで拡散することができる。そのため、反応ははっきりとした界面では進行せずかなり広い範囲にわたって同時に進行する。そして、拡散速度に比べて、反応速度が大きい場合には、多孔質粒子内部の反応生成物の濃度は一様ではなく、粒子内の各点において反応速度は異なった値をとる。すなわち、微少な多孔質粒子でも、均一な場として取り扱うことができない。ここで、粒子内部の拡散と反応を同時に考慮するという有効係数の概念を導入する。有効係数とは細孔内の表面が反応に利用される割合を表している。有効係数が 1 に近いほど細孔内の拡散抵抗を無視できるような理想系の状態に近づく。

まず、球状試料の中心から任意の位置  $r$  と  $r + dr$  の間の微小球殻部分で物質収支を取ると、(1) 式のように表される。

$$D_s \left( \frac{d^2 C_A}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dC_A}{dr} \right) = k(C_A - C_C^{eq}) \quad (1)$$

ここで  $D_s$ :有効拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $C_A$ :任意の位置での反応ガス A の濃度( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )である。これを  $r=r_0$  で  $C_A = C_A^0$ 、 $r=0$  で  $dC_A/dr = 0$  という初期条件で解くと、粒子内の濃度分布の解として (2) 式が得られる。

$$\frac{C_A - C_A^{eq}}{C_A^0 - C_A^{eq}} = \frac{r_0 \sinh\left(m \frac{r}{r_0}\right)}{r \sinh m} \quad (2)$$

ここで、 $m$ : Thiele modulus (-)である。Thiele modulus は、 $m = r_0 \sqrt{\frac{k}{D_s}}$  (-)で表され、粒子内における反応速度と拡散速度の比をとった無次元数である。

また、固体粒子 1 個あたりの反応速度  $-\bar{r}_A$  は (3) 式のように表される。

$$-\bar{r}_A = \int_0^{r_0} k(C_A - C_A^{eq}) \times 4\pi r^2 dr \quad (3)$$

(2) 式と (3) 式を組み合わせると、(4) 式が得られる。

固体粒子 1 個あたりの反応速度  $-\bar{r}_A$  は (1) 式のように表される。

$$-\bar{r}_A = \frac{4}{3} \pi r_0^2 k (C_A^b - C_A^{eq}) \frac{3}{m^2} (m \coth m - 1) \quad (4)$$

ここで、 $m$ : Thiele modulus (-)である。

(4) 式より、 $-\bar{r}_A$  は同一実験条件では  $m$  のみに依存し、 $m \rightarrow 0$  のときに (5) 式に示す最大値  $-\bar{r}_{A,ideal}$  をとる。

$$-\bar{r}_{A,ideal} = \frac{4}{3} \pi r_0^2 k (C_A^b - C_A^{eq}) \quad (5)$$

これより、有効係数  $E_f$  は (6) 式のように表される。

$$E_f = \frac{-\bar{r}_A}{-\bar{r}_{A,ideal}} = \frac{3}{m^2} (m \coth m - 1) \quad (6)$$

このように、有効係数は Thiele modulus のみの関数である。  $m$  が小さい時 ( $m < 10$ ) 反応速度に比べ拡散速度が速く、ガスが内部まで侵入することができるので、固体粒子内のガス濃度は場所によらず一様に近くなる。

## 質問票回答の補足資料② 「鉄鉱石 ピソライトに関する説明」

### 鉄鉱石のTG-DTA曲線

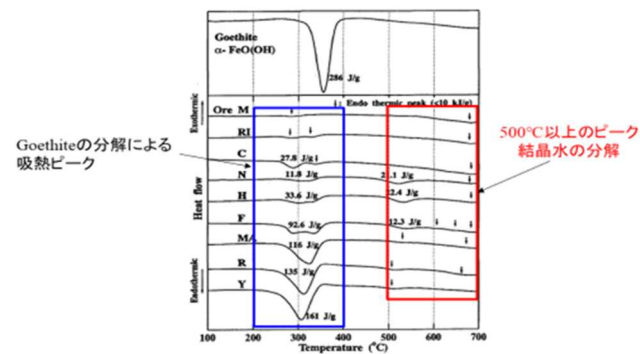


Fig. 1. DSC curves for iron ore samples.  
鉄と鋼 vol 83(1997)No9 p539 葛西ら

環境調和型プロセス技術の開発



質問票回答の補足資料③ 「石炭の特性と試験方法の説明」

石炭の軟化溶解性試験方法

1

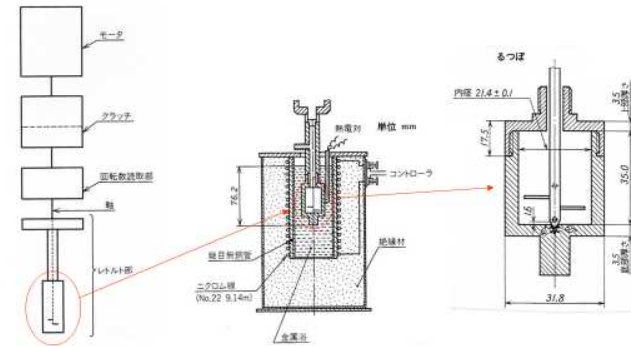
分類	試験法名	測定値名	同略号(例)	
軟化溶解状態に関わる性状の測定	膨張性	るつば膨張試験	るつば膨張指数 CSN	
		KBS試験	KBS曲線	
		グレイ・キング試験	グレイ・キングコアス型	
		オーゼベル・アルニユジラトメータ, ルールジラトメータ	最大膨張率 TD	
	粘着性 (約350~500℃間の性状)	ログ試験	ログ指数	
		カンブレドン法	カンブレドン指数	
		粘結力試験	粘結力指数 CI	
	流動性	ギーセラープラストメータ	最高流動度 MF	
	コークス化性 (約350~1000℃間の性状)	軟化溶解性	サボジニコフプラストメータ	収縮率(x指数) x 軟化溶解層厚さ(y指数) y
		小型乾留法	LCT試験	LCT指数
かん焼き試験				
コークス強度試験		ドラム試験	ドラム指数 $DI_{15}^{100}, DI_{15}^{150}$	
		マイカム試験	マイカム指数 $M_m, M_{10}$	
		タンプラー試験	タンプラー指数 $T_{25}, T_{10}$	
		シャッター試験	シャッター指数 $SI_{10}^{100}$	
		工業法		

石炭の流動性をギーセラープラストメータで測定

環境調和型プロセス技術の開発

ギーセラープラストメータ

2

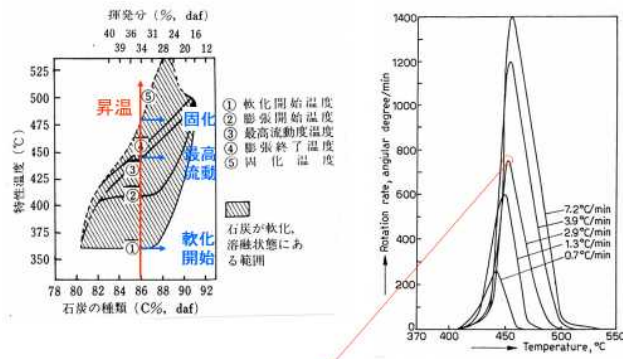


昇温しながら攪拌子の回転数を計測

環境調和型プロセス技術の開発

ギーセラーによる流動性測定

3

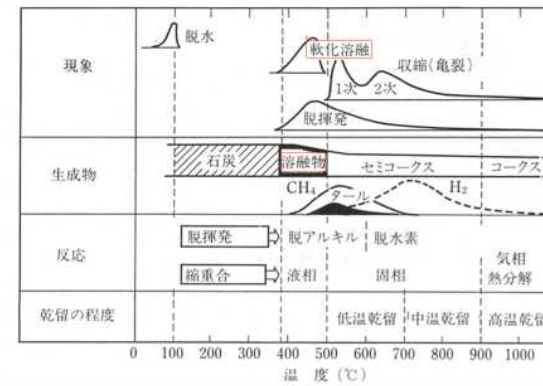


最高流動度 (MF)/ddpm

環境調和型プロセス技術の開発

乾留過程における現象

4

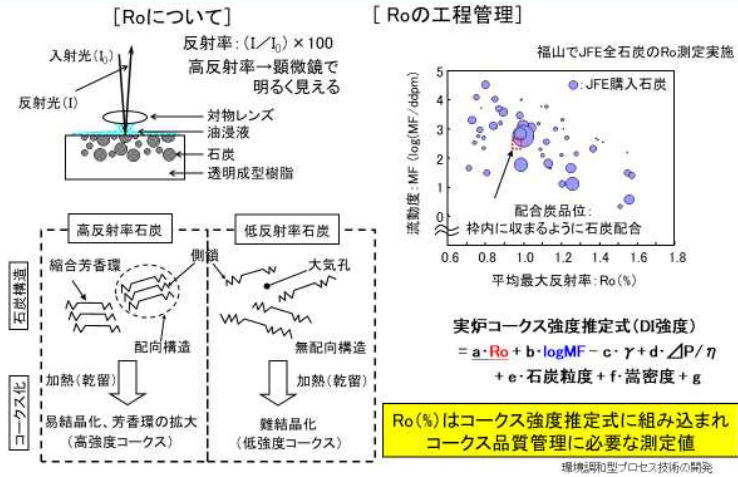


石炭(固相)は昇温に伴い脱水から始まり、溶融軟化後(液相)の揮発分の発生・縮合反応を伴い、固化(固相)しコークスを生成

技術の開発

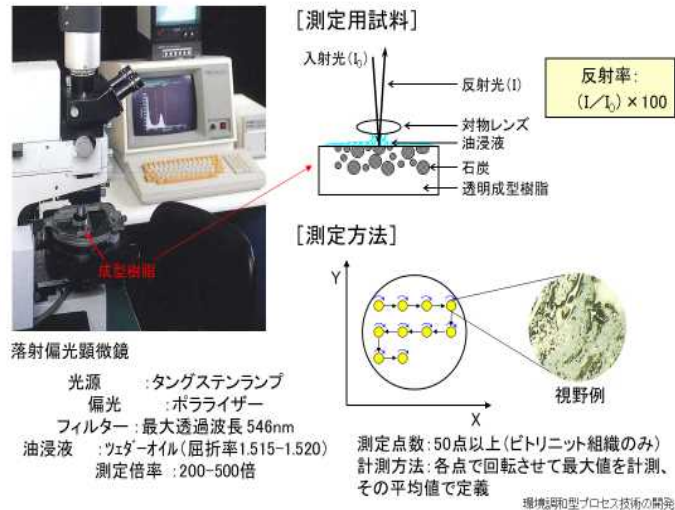
## 反射率(Ro)の必要性

5



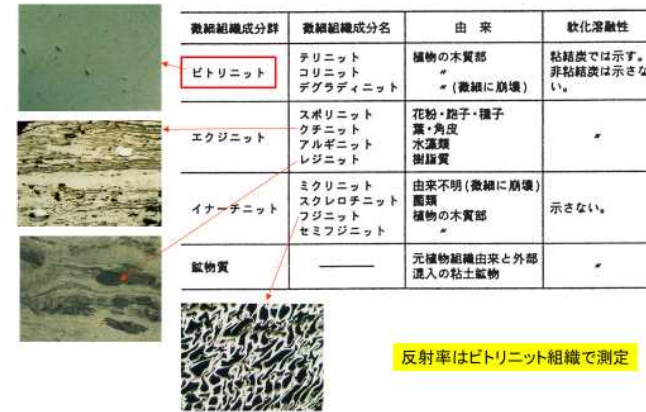
## 顕微鏡による反射率(Ro)測定

7



## 石炭の組織

6



## 反射率(Ro)分布の有用性

8

[Ro分布を測定する意義] 平均最大反射率は頻度分布より算出

