

技術展望

高リン鉄鉱石の対応を狙った国家プロジェクトを中心とした
今後の製鉄分野での産学連携の展望Prospect of Industry-university Cooperation in the Future Ironmaking Field Centering
on the National Project Aiming at Correspondence of High Phosphorus Iron Ore齋藤 公 児*
Koji SAITO

抄 録

中国の経済成長、鉄鋼生産は急速に伸展し、その粗鋼生産の増加は、鉄鉱石資源からの高炉での鉄鉄生産に依存し製鉄原料事情は大きく変化した。需給のタイト化を反映して、従来の安定した価格は高騰した後、乱高下している。従来の予想を超えたこの劇的な環境変化には、従来の延長のような取り組みとは異なる革新的なプロセス開発を含めたアプローチが急務である。特に今後予想される鉄鉱石中のPの上昇に関しては、今まで以上に緻密で且つ大胆な産学連携が必須であり、国家プロジェクトの創出による新たな取り組みについて述べた。

Abstract

The economic growth of China, the rapid expansion of steel production, and the increase in crude steel production depended on the production of pig iron in blast furnaces from iron ore resources, and the situation of raw materials for iron making changed significantly. Reflecting the tightness of supply and demand, conventional stable prices have risen and then become volatile. To this dramatic environmental change beyond this conventional expectation, there is an urgent need for an approach that includes innovative process development that differs from efforts such as conventional extension. In particular, with regard to the rise of P in iron ore to be expected in the future, a more precise and bold industry-academia collaboration is essential, and new efforts by creating national projects are urgently needed.

1. 緒 言

製鉄分野では日本鉄鋼協会での研究会活動や日本学術振興会での54委員会や148委員会での活動、またいくつかの国家プロジェクトを通じて、幅広い分野で且つ長きに渡り産学連携を継続して、様々なプロセス開発等を進めてきている。その結果多くの成果が得られており、具体的には新しいプロセスとして確立されて現在でも稼働し大きな成果を挙げている例が多々あり、次世代コークスプロジェクトとして推進されたSCOPE21はその代表例である¹⁾。また現在でも多くの産学連携を絡ませながら10年を超えて長期に渡る環境調和型製鉄プロセス(COURSE50)プロジェクト²⁾が進行中である。

しかし鉄鉱石、石炭の資源の供給環境は、2000年以降

大きく変化し、製鉄操業にも大きな影響を及ぼしている。中国の経済成長、鉄鋼生産は急速に伸展し、その粗鋼生産の増加は、鉄鉱石資源からの高炉での鉄鉄生産に依存している。それに伴い製鉄原料事情は大きく変化した。需給のタイト化を反映して、従来の安定した価格は高騰した後、乱高下している(図1)^{3,4)}。そこで本稿では、資源-原料を考えるとときに重要な点に触れた後に資源、特に鉄鉱石原料の現況と今後について述べ、同時にそれらの変化に応じた鉄鋼業における新しいプロセス開発の今後の動向を産学連携の推進の在り方を含めて議論したい。

2. 本 論

鉄鋼製造での上工程プロセス自体には非常に大きな変貌があったとは言えないが、ここ数年で日本の鉄鋼業を取り

* 技術開発本部 顧問 博士(理学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

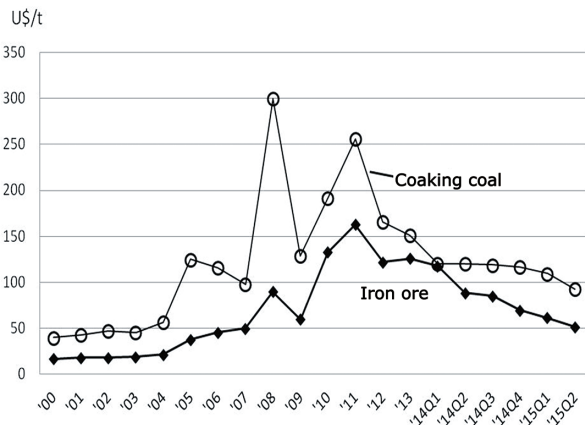


図1 鉄鉱石、コークス用石炭の価格推移
Price change of iron ore and coal for coke

巻く環境は既に述べたように劇的な変化を遂げている。再度強調するが、それは大別して、東アジアを中心とした旺盛な原燃料の需要に伴い、いわゆる原燃料の劣化問題を中心とした鉄鋼プロセスにおけるインプット条件の劇的変化と、エネルギー・環境問題の顕在化に伴う鉄鋼プロセスからのアウトプット条件の劇的変化の2点に帰着できる。ここでは資源及び山元の変化^{3,6)}にどのように鉄鋼プロセスが対応してきているのかを、また今後対応していくべきかを、石炭資源と鉄鉱石資源に分けてその中での産学連携での成果や、また今後の在り方やその推進の在り方等に言及していきたい。特に鉄鉱石原料変化に応じた鉄鋼業における新しいプロセス開発の今後の動向を産学連携の推進の在り方を含めて議論したい。

2.1 非微粘結炭増使用を主眼においたプロセスの発展

原料炭の加熱時の膨張性低下に対しては、コークス炉内への石炭充填密度（嵩密度）の増大がコークス強度維持に大きく寄与することは先に報告例が多々ある⁷⁻¹⁰⁾。充填密度の向上は、石炭水分の低減によるものと石炭の塊成化によるものの2つに大別される。

石炭水分の低下においては、かつては湿炭（水分9～12%）を装炭する操業が主であったが、現在では調湿炭（水分6～7%）操業の炉も大きな割合を占めている。更なる低水分化を図ったプロセスでは、1992年に新日本製鉄(株)（現日本製鉄(株)）大分製鉄所で操業を開始したDAPS（水分2～4%）がある。DAPSは、水分低下により増加する微粉発塵に対し、予め流動層乾燥機により微粉と粗粉を分離し、微粉を塊成化することで発塵を抑制するものである¹⁵⁾。

また、石炭の塊成化によるアプローチは、原料炭中の最大で約30%を成型炭（ブリケット）とし、それを粉炭と混合してコークス炉に装入する方法がある。成型炭内の石炭配合としては、まずは配合炭の一部をそのまま成型する手法が開発され¹⁶⁾、その後は非微粘結炭の膨張不足を補うために高密度の成型炭内に集中的に配合すると共に、粘結材

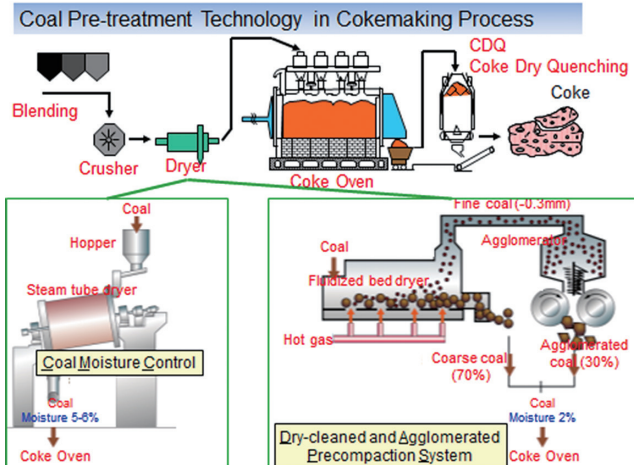


図2 非微粘結炭増配を主眼においた各種事前処理プロセス
Various pretreatment processes focusing on utilization of non-coking coal



図3 名古屋製鉄所に導入されたSCOPE炉の2号機
Second SCOPE21 process introduced in Nagoya Works

であるアスファルトピッチ（ASP）を添加するスミコール法¹⁷⁾が開発されている。嵩密度増加のみならず粉砕も含めた、非微粘結炭増配を主眼においた各種事前処理プロセスについて図2にまとめた。

水分低下による充填密度向上と微粉成型技術を組み合わせ、さらに石炭の急速昇温による粘結性向上効果をも付与した複合プロセスが、2008年に同じく大分製鉄所で1号機が操業を開始したSCOPE21プロセス（水分0%）である。このプロセス構築には産学連携が非常に大きな役割を担っていた。日本鉄鋼協会の特別基礎研究会でのシーズ技術探索からスタートし、図にあるようなスケジュールで開発されて初めて大分製鉄所での1号機へと至った経緯で、実際に基礎研究から実機化まで約20年が経過している。非微粘結炭の配合率は、従来の湿炭操業では高々20%であるが、SCOPE21プロセスにおいては50%超にて安定な操業を継続し、2号機も名古屋製鉄所に2013年に設置（図3）され同様に安定稼動中である¹⁸⁾。

産学連携の効果的な推進には、①プロジェクトの効率的な推進には共通のニーズ、②多方面からの学問的な支援体制と強力なリーダーシップ、③参画各社の役割分担の明確さが重要と考える。特に“産”は、目的を明確にして学とコ

ンタクトする。また“学”は産のニーズを良く汲み取り、成果を形として残す（商品やシステムとして仕上げる）ところまで係わることが必須であり、産学連携には小さなところから基礎を築き、互いを意識しないで、議論に没頭できるようにするのが第一歩目で、これがSCOPE21での成功になったと思われる。

2.2 更なる石炭資源の劣質化に対する今後の取り組み

前節の事前処理プロセスの発達により非微粘結炭の増割合が達成されているが、これは非微粘結炭が多少なりとも粘結性を有すること、さらに室炉法であることが前提となっている。これまで利用してきた非微粘結炭から、従来未利用の劣質炭への資源拡大を視野に入ると、今後は以下のような技術検討が必要になると考えられる。

まず、化学的改質（ケミカルアップグレード）及び粘結性の補填である。粘結性を示す石炭に対し、劣質炭は含酸素官能基を多く有するため、加熱時に脱酸素反応に伴い架橋形成（高分子化）するため熱的活性すなわち粘結性を示さない。蘆田らは、このような劣質炭に対し比較的温和な条件での溶剤処理（1-メチルナフタレン溶剤、350℃）にて架橋形成を抑制しつつ改質を行い、非微粘結炭相当の代替原料に転換できる可能性を示した¹⁹⁾。また、粘結性を示さない石炭に対しては粘結性補填材の添加も有効である。亜瀝青炭の溶剤抽出から得られるHyper Coalを亜瀝青炭自身に添加することで、粘結炭由来のコークスと同等の圧壊強度を有するコークスが得られたとの報告²⁰⁾もある。

上記の化学的改質を経た劣質炭に対し、物理的改質（熱間加圧成型）を施すとさらに効果的である。現状のプロセスでも成型技術が使用されていることは先述したが、より強固にするためには熱間条件下で成型することにより石炭の有する可塑性を利用することが有効である。林ら²¹⁾は熱間条件下でのバインドレス成型により、一般的な高炉用コークスよりも高い冷間強度を有するコークスを劣質炭から得ている。

上記の化学的改質と物理的改質を併用することで、劣質炭を使用したコークス製造への道筋が開かれるものと考えられる。より劣質な石炭資源の利用を主眼においたコークス製造法においては、従来の室炉法の枠を大きく超えたプロセスを想定する必要があると考えられる。“新規コークス製造プロセス要素技術研究会”（日本鉄鋼協会のII型研究会）では産官学連携のもと、化学的・物理的改質技術を軸にした、実プロセスを想定した検討を実施し図4のようなプロセスを提案した。今後の展開が期待される²²⁾。SCOPE21で培った流れがこのように石炭・コークス分野では産学連携が継続的に推進されている。

2.3 鉄鉱石微粉化に関するプロセス動向

天然資源では、採掘されるときに混入する不純物を除く

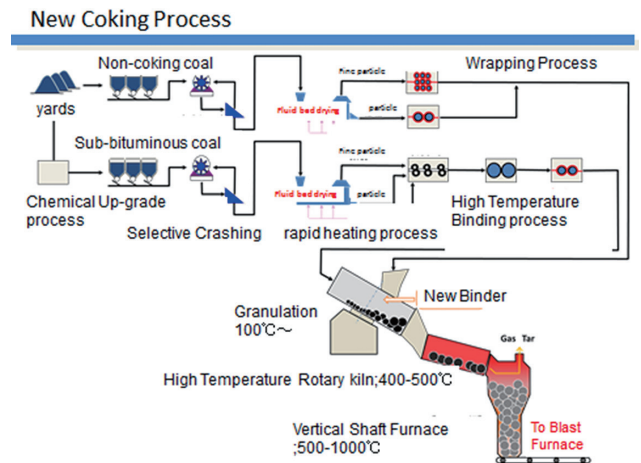


図4 将来的コークス製造プロセスフローの一例
Example of the future coke production process flow

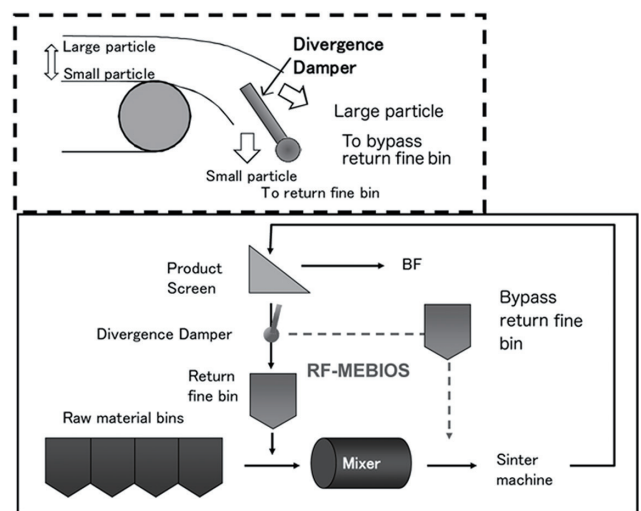


図5 RF-MEBIOSのプロセスフロー
Process flow of RF-MEBIOS

ため選鉱が行われることが多い^{23,24)}。選鉱の前段階としての単体分離が重要である。鉄鉱石では、Fe 40%前後のBIF (Banded Iron Formation) が、45 μm 以下に磨鉱して選鉱しFe 67%のPellet Feedの生産が拡大されつつある。このことは焼結工程での微粉鉄鉱石の利用の可能性が拡大し、色々なプロセス開発がなされている。その代表例として微粉鉄鉱石の事前処理及び微粉鉄鉱石を利用したときに起きる問題である焼結の生産性の低下を防ぐ目的で、パンペレタイザーをフル活用したHPS (Hybrid Pelletized Sinter)²⁵⁾や部分活用するRF-MEBIOS (Return Fine - Mosaic Embedding Iron Ore Sintering)²⁶⁾等がある。

ここではRF-MEBIOS (図5)に関して説明する。焼結生産性向上を目的とした焼結原料層の高通気性は、RF-MEBIOS法で達成できる。この方法は乾燥状態の返鉱を造粒せずに造粒後の湿潤原料へ添加する方法である。本技術も部分的には日本鉄鋼協会での焼結研究会から生まれたシーズ技術であり、高通気性の要因は、擬似粒度(-0.25 mm)比率低下及び低充填密度の2点である。前者は、乾

乾燥状態の返鉱を除いて造粒するので、装入時原料水分一定条件下では、造粒時水分を高められる効果である。本技術は現在5機の焼結機へ適用され、全ての焼結機において生産性向上が確認され、その効果を微粉鉄鉱石の使用比率の増加に転換できた。ただこのようなアプローチでは限界があり、今後はさらに微粉鉄鉱石を焼結で利用できるよう新しい考え方の事前処理や造粒技術の開発が望まれる。

2.4 今後の鉄鉱石のP上昇に対する対応

現在、我が国の鉄鉱石資源の輸入は年間約1.6兆円で、そのうち豪州とブラジルに90%依存しているが、両国産の鉄鉱石は今後劣質化(Fe含有量の低下)していくことが予測されている²⁷⁾。これにより、2030年には高炉スラグ量が現行の約10%増加し、高炉の還元材比(コークス及び石炭使用比率)の上昇(溶銹1t当たり6~13kgの悪化)や生産性の低下を招き、我が国鉄鋼業の国際競争力が大きく低下する恐れがある²⁸⁾。さらに、豪州産の鉄鉱石は鋼材の特性を劣化させる不純物Pの濃度上昇(+0.051%の上昇, 上昇率42%)も予測されており、脱P工程である製鋼の負荷増加と製鋼スラグ増加、また、高級鋼の競争力低下も懸念される(図6)。

豪州には高Fe、高P鉄鉱石資源が未開発で残されていることから²⁹⁾“鉄鉱石の脱Pプロセス”を新たに構築することによって、これら鉄鉱石の有効活用を図り、上記の資源劣質化による国際競争力低下を回避し、我が国の鉄鋼業の継続的発展に貢献していかなければならない。そのために必要な、①鉄鉱石中のP賦存状態の評価、②鉄鉱石の脱P処理、③脱P超微粉鉄鉱石の塊成化、④脱Pスラグの資

源化、⑤全体プロセス評価に取り組むことが急務である。特に直近、大学等を中心に本検討に不可欠な微小部X線・高温走査型電子顕微鏡技術や還元気化脱P技術等の新シーズ技術が提案されていることから、これらの積極的な活用を図っていくべきである(図7)。

本課題は、鉱山やその処理、分析や解析、製銹、製鋼と多工程の取り組みとなり、最終的なプロセスフロー構築には最適化検討が必須である(図8)。そのためには今までの産学連携を超えた新たな進め方が必須となる。従来のシーズ研究は学(大学)、それを育てるのが産(企業)のような考えではなく、最初の段階から一緒に取り組んでいくことが重要で、現在NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)での先導研究“NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/鉄鉱石の劣質化に向けた高級鋼材料創製のための革新的省エネプロセスの開発”³⁰⁾ではそのようなニーズとシーズを互いに議論しながらプロジェクト運営を実施している。またこのような研究は関連する分野も広く、従来の鉄鋼関係の研究者以外の産学連携も重要となってくることになり、非常に多分野に渡る産学連携を構築することが必須である。

そこでこの大きな課題では、各要素技術の更なる高度化、確性向上を図りつつ、大型試験プロセス検証、一貫評価までの全てを本格的に実施し、それらの組み合わせによる省エネルギー性や経済性を評価する必要がある。併せて、実用化に向けて鉄鉱石解析技術、脱P技術、焼結使用技術、Fe・P回収資源化技術を個別に確立しつつ、最適組み合わせによる革新的な資源劣質化対応技術及びCO₂削減技術を達成することが最終的なゴールとなる。近年国内の非鉄

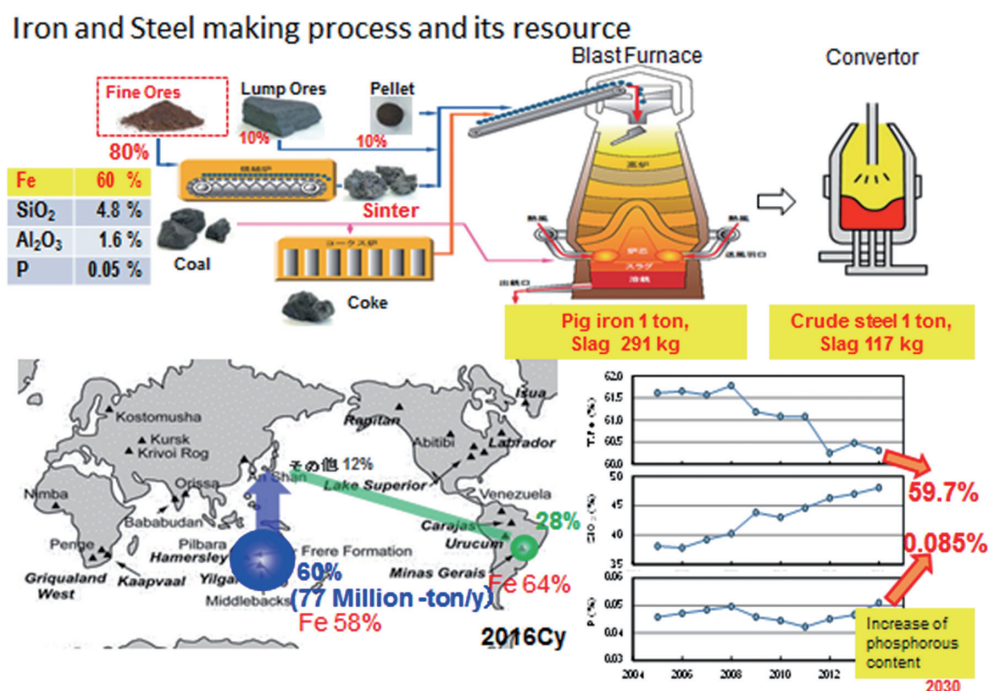
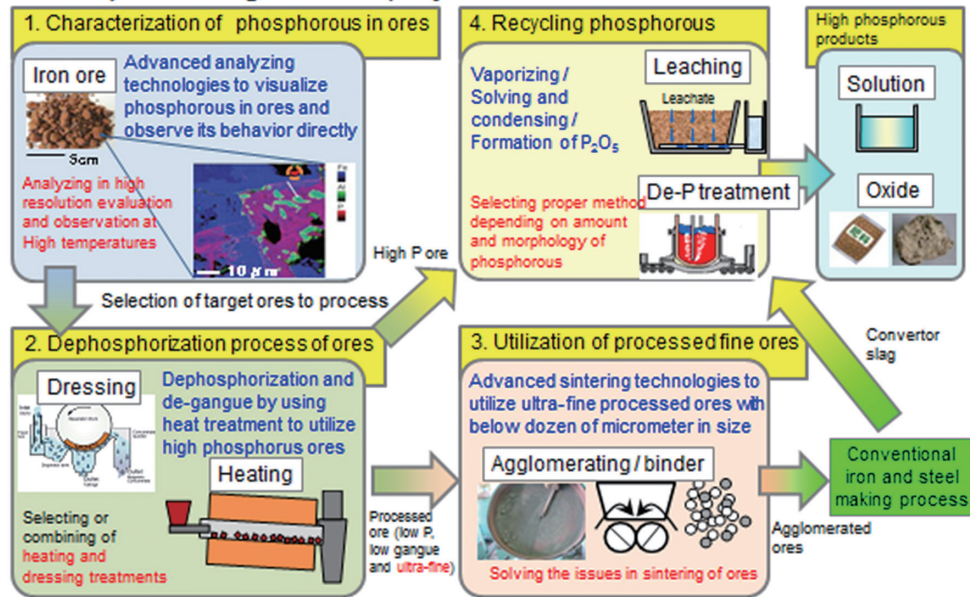


図6 鉄鉱石中のP上昇の問題点とその背景
Problem of P rise in iron ore and its background

Four key technologies in the project



Four key technologies can establish innovative and integrated process to adapt to every future resource changes flexibly.

図7 鉄鉱石中のPの構造解析とその脱P処理の考え方
Structural analysis of P in iron ore and concept of de-P treatment

Overview of the project, Process flow change

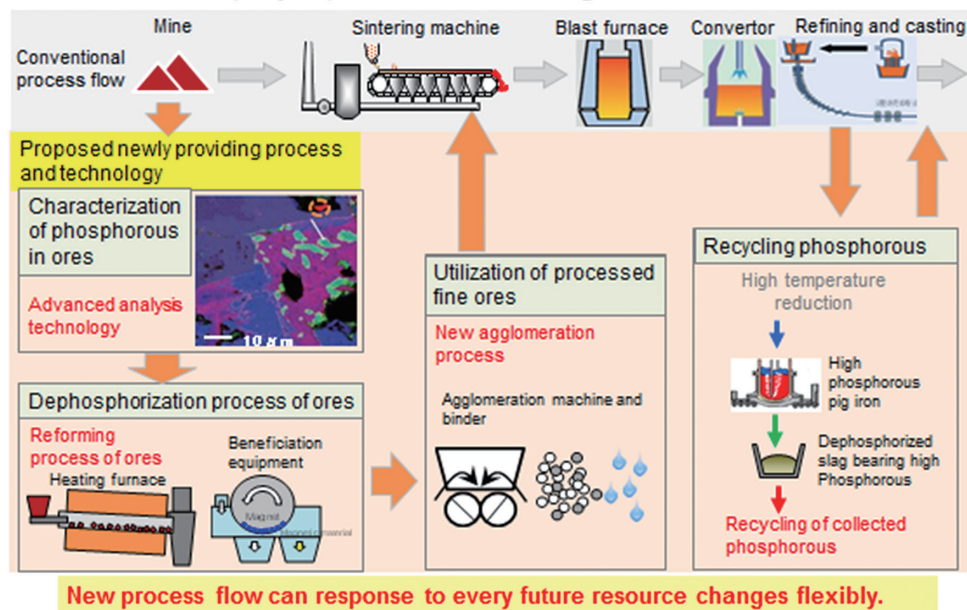


図8 本研究課題の全体感とその効果
Overall feeling of this research subject and its effects

メーカーも、資源劣質化や枯渇による資源対応技術開発を急激に推し進めていることから、この流れを活かしつつ鉄鋼以外の分野との連携強化を模索することも重要となる。

今まで述べた課題の解決には、鉄鉱石特性解析に基づく新規処理技術を開発、適用し、資源劣質化に基づくコスト増、品質低下に由来する我が国の鉄鋼業の国際競争力低下を防ぐと共に、世界最高級の鉄鋼材料を継続して供給することによって我が国の継続的發展に寄与すると考える。例えば鉄鉱石の劣質化及びP上昇による増エネルギーは110

～150万k1(原油換算)/年、CO₂排出増量は約420～600万t/年と試算され、本技術によりこれを抑制する効果が期待できる³¹⁾。

3. 結 言

最近の10年、製鉄原料は大きな変化、変動を経験してきたが、中国の動向が決め手ではありながら、その見通しも難しい。最近では資源の価格の乱高下とその品質の劣化が重要な話題である。また長い目で今後の資源を見た場合、

前述したように、その品位の低下には恐ろしい予測すらある。従来の予想を超えたこの劇的な環境変化には、従来の延長のような取り組みとは異なる革新的なプロセス開発を含めたアプローチ、つまりプロセスそのものを革新的に開発することが急務である。

我々は、このような日本の鉄鋼業を取り巻く環境変化から生じた問題点の解決のために、今こそ抜本的な革新プロセス開発に取り組みねばならない。勿論実機開発には時間が掛かるので、最終的なプロセスイメージをきちんと視野に入れたプロジェクト化が急務である。そのためにも産学で一致協力、連携して、革新的な製鉄プロセス開発のための議論の場を設定していくことが必要と思われる。鉄鉱石におけるPの上昇に対するプロジェクト化は今後の製鉄分野での新たな産学連携の構築のための非常に良いテーマと思われる。

独創的且つ効率的な産学連携のためには、鉄鋼産業においては、産側の研究者の説明能力(特に異分野に対して)と独創的な開発能力が不足気味であり、今後の人材育成での課題となる。新しい産学連携課題としては、例えば①産学連携間での人材の交流によるシナジー効果、②学生のインターンシップの期間拡大、③大学での人材育成プログラムへの産側の積極関与等があると思われる。

参考文献

- 1) Nippon Steel Monthly. 182, 1-8 (2008.10), https://www.nipponsteel.com/company/publications/monthly-nsc/pdf/2008_10_182_01_08.pdf
- 2) COURSE50 : <http://www.jisf.or.jp/course50/tecnology03/>
- 3) 日本鉄鋼連盟 HP : <http://www.jisf.or.jp/data/>
- 4) 石炭エネルギーセンター HP : <http://www.jcoal.or.jp/publication/>
- 5) 大和田秀二 : Journal of MMIJ. 123 (12), 11-17 (2007)
- 6) 中村崇 : 非鉄精錬技術の課題と展望. 日本学術会議主催公開講演会「鉱物資源の持続可能性と資源問題への展望」, 2008
- 7) 有馬孝 : 鉄と鋼. 87, 274 (2001)
- 8) 野村誠治, 有馬孝, 奥原捷晃 : CAMP-ISIJ. 4, 1108 (1991)
- 9) 野村誠治, 有馬孝, 加藤健次, 奥原捷晃 : CAMP-ISIJ. 17, 638 (2004)
- 10) 窪田征弘, 野村誠治, 有馬孝, 加藤健二 : 鉄と鋼. 92, 833 (2006)
- 11) 鷹薮利公, 崎元尚土, 佐藤豪人, 奥山憲幸, 宍戸貴洋 : 石炭科学会議発表論文集. 48, 82 (2011)
- 12) 崎元尚土, 鷹薮利公, 堺康爾, 宍戸貴洋, 奥山憲幸, 濱口眞基 : 石炭科学会議発表論文集. 51, 12 (2014)
- 13) 林裕介, 愛澤禎典, 上坊和弥, 野村誠治, 有馬孝 : 鉄と鋼. 100, 118 (2014)
- 14) 齋藤泰洋, 松尾翔平, 金井鉄也, 外石安佑子, 内田中, 山崎義昭, 松下洋介, 青木秀之, 野村誠治, 林崎秀幸, 宮下重人 : 鉄と鋼. 100, 140 (2014)
- 15) 加藤健次 : 鉄と鋼. 96, 196 (2010)
- 16) 城博, 井田四郎 : 鉄と鋼. 42, 226, 910 (1956), 43, 1024 (1957)
- 17) 南澤勇, 奥井信之, 山田健彦, 浜村欣次, 神原定良 : 燃料協会誌. 59, 841 (1980)
- 18) 日本製鉄 HP : https://www.nipponsteel.com/news/20130618_100.html
- 19) 蘆田隆一, 岩瀬一洋, 三浦孝一 : CAMP-ISIJ. 28, 3 (2015)
- 20) 鷹薮利公, 崎元尚土, シャーマ・アトゥル : CAMP-ISIJ. 28, 9 (2015)
- 21) 林潤一郎, 工藤真二 : CAMP-ISIJ. 28, 11 (2015)
- 22) 青木秀之, 松尾翔平, 井川大輔, 宮本幸典, 齋藤泰洋, 松下洋介 : CAMP-ISIJ. 28, (2015)
- 23) Kokal, H.: Mining, Beneficiation, and Agglomeration of Iron Ores within ArcelorMittal. National Seminar on Beneficiation of Iron Ore of Jharkhand, February 18-19, 2008, p.104-126
- 24) Raj, B.: Development of Process Flowsheet for Beneficiation of Indian Banded Haematite Quartz (BHQ) Iron Ore. National Seminar on Beneficiation of Iron Ore of Jharkhand, February 18-19, 2008, p.68-91
- 25) Sakamoto, N., Noda, H., Iwata, Y., Saito, H., Miyashita, T.: Tetsu-to-Hagané. 73, 1504 (1987)
- 26) Matsumura, M., Yamaguchi, Y., Hara, M., Kamijo, C., Kawaguchi, T., Nakagawa, Y.: Tetsu-to-Hagané. 100 (2), (2014)
- 27) 例えば BHPB, Rio Tinto 発表の情報 : <http://www.australianminesatlas.gov.au/mapping/files/australianironorequality.pdf> 等
- 28) 日本鉄鋼協会第84回製鉄部会資料「最近の高炉合理化技術」, 1994
- 29) 西豪州鉱山石油省データから作成「西豪州鉱山石油省登録 Drill Core サンプルデータ」
- 30) NEDO HP : https://www.nedo.go.jp/koubo/CA3_100165.html
- 31) 齋藤公児 : 鉄鋼資源動向と今後の製鉄プロセス開発. 金属. 87 (11), (2017)



齋藤公児 Koji SAITO
技術開発本部 顧問 博士(理学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511