

TODAY



基盤材料の持続可能な利用を巡る課題と対応

東京大学 大学院 工学系研究科
マテリアル工学専攻
教授 星野 岳穂

東京大学大学院マテリアル工学専攻の「基盤材料マネジメント工学講座」を昨年度まで担当されていた榎学教授の後任として、本年4月に着任致しました。醍醐市朗准教授と共に、これから令和時代の本研究室を支えてまいります。

本講座は、足立教授、松野准教授（当時）、後藤教授、榎教授と受け継がれた御指導の下、鉄鋼等各種の基盤材料の有用性を再認識し、生産段階からリサイクル・廃棄段階に至るライフサイクル全体での環境影響・資源効率性を定量的に評価する手法を研究し、それを基に基盤材料を利用する際の最適な姿を示していくことを目標としております。国際的にも、国連で採択された「持続可能な開発目標(SDGs)」の達成に向け、政府レベルだけでなく各企業・金融機関でも自発的に取り組む潮流が生じておりますが、産業社会を構成する基盤材料についても、その持続可能性を戦略的に確保することが益々重要な時代になってきます。

実際、中国・インドをはじめとする新興国の発展は急速であり、基盤材料の世界消費量も急増中で、材料資源の長期的な持続可能性が、眼前の課題として顕在化し始めています。例えば、中国の鉄鋼生産量は1996年に日本を抜いて世界第1位になった後も増加し続け、現在は年間9億トンという圧倒的な鉄鋼生産大国となりました。続くインドの鉄鋼生産も本格的に増加し始めており、昨年ついに日本を抜いて第2位となりました。他の材料資源も同様に生産・消費が増加しています。いきなり枯渇するまでにはいかないにせよ、このままでは探鉱・採鉱等の速度を生産・消費の速度が上回り、供給制約時代が到来するのではないかと不安になります。それ以前に、鉱石の品位が低下していくことも、新たな懸念材料です。

基盤材料の環境負荷を低減する取組みは、これまで材料のライフサイクルの各段階で進められてきました。しかし今後は、環境負荷だけでなく供給制約もより強く意識することが大切になります。欧州では、既に高度な資源循環社会の構築に向けて枠組み作りを進めており、日本にも、国内にとどまらずアジア全体を視野に入れた資源循環の枠組みを考える役割が期待されます。

材料資源の持続可能性を高めるには、リサイクルの推

進が重要なのは論を待ちませんが、リサイクルは、回収時の多大な労力だけでなく、解決すべき様々な課題があります。スクラップを何とか回収しても、材料組成は様々なため、リサイクルすると不必要な添加元素が混入してしまいます。また、自動選別装置の能力には限界があるため、選別の過程で意図せざる難除去性の不純物元素(トランプエレメント：鉄鋼に対する銅・錫等)が不可避免的に混入し、リサイクルを繰り返す毎に母材中に濃化して例えば表面脆化等の悪影響が生じます。勿論、天然資源から生産する新生材でリサイクル材の不純物濃度を許容値以下に希釈すれば、元の用途に繰り返し使用(水平リサイクル)することは可能ですが、リサイクル材の量が多ければ希釈には限界があり、不純物元素の混入に伴って品質が低下すれば別用途へ利用(カスケード・リサイクル)せざるを得ません。また、これまでは不純物元素の混入源となり得る、国内での解体分離が経済的に見合わない「雑品スクラップ」は中国等に輸出されていましたが、昨年中国は輸入禁止としたため、今年以降、雑品スクラップが滞留し、国内で自動選別処理を行う量が増加することになれば、結果としてスクラップ中の不純物元素濃度が上昇する懸念があります。まずは、不純物元素の混入源とルートを分析し特定することが、急務の課題です。

現在世界の生産・消費の約5割を占める中国の鉄鋼材料は、数十年後には次々とスクラップとして排出されリサイクル材が大幅に増加することは容易に予測でき、これも中期的な重要課題です。何千年の歴史を経て確立されている現在の鉄鋼の持続的なマテリアル・フローでは、上述の通り、新生鋼材の生産とリサイクル鋼材の双方の生産量の最適なバランスが必須だからです。マテリアル・フローは、全体を1つに捉えた環境負を軽減・持続性確保が重要で、リサイクル材だけを見て、環境負荷が小さい材料と評価して優先的に使用すればよいという評価は、全体で見れば合理的・持続的ではありません。

資源循環社会の構築には、実はこうした複雑で多様な課題の同時解決が必要であり、その対応策を議論するには、まず、基盤材料のマテリアル・フローの正確な把握・推計と、工学的視点から客観的で比較可能な評価指標を開発することが必須です。その上で、材料の品質別のリサイクルの技術的・制度的可能性、分解の容易な設計手法、不純物元素が混入しても材料機能を低減させない組織制御等の研究開発を進めていくことが大切です。こうした問題意識の下、JRCM ご関係の皆様にご指導を頂きながら、研究、人材育成、情報発信や提言に努めてまいります。宜しくお願い申し上げます。

NEDO 事業「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」(平成 29～30 年度実施)の成果概要

一般財団法人 金属系材料研究開発センター
環境・プロセス研究部 主席研究員 務川 進

1. 目的と概要

地球温暖化対策として、温暖化ガスの排出削減が求められている。2015 年に開催された第 21 回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) において、CO₂ の排出量の削減目標が各国・地域ごとに示された (パリ協定)。

製鉄プロセスにおける CO₂ 排出量削減のため、NEDO では 2013 年度より「環境調和型プロセス技術の開発事業」の「水素還元等プロセス技術の開発事業」において、高炉法による製鉄法における CO₂ 発生量を抜本的に削減するため、高炉からの CO₂ 発生量削減と、高炉ガスからの CO₂ 分離・回収技術の開発を推進している。本技術開発は以下 COURSE50 (CO₂ Ultimate Reduction System for cool Earth 50) と称する (図 1^{[1])}。

また、「環境調和型プロセス技術の開発事業」のもう一つの技術として、「フェロコークス技術の開発事業」を推進している。本技術は、一般炭と低品位鉄鉱石を混合成型・乾留したフェロコークスを用いることにより、高炉内での還元効率を飛躍的に高めることにより省エネルギー、CO₂ 削減を目指す技術である。

これら、我が国独自の「COURSE50」、「フェロコークス技術」の実機化を推進するためには、

世界の技術、および市場動向を調査し、本事業の技術的優位性を明確化することが重要である。そのため、本事業では、本技術の優位性、市場ポテンシャルの調査を行った。また、その際、下記 5 つの側面について、国・地域ごとの分析を行った。

- I. 社会的要因 (Society)、II. 技術的要因 (Technology)、III. 経済的要因 (Economics)、IV. 環境的要因 (Environment)、V. 政治的要因 (Politics)

特に、COURSE50 の実機化が 2050 年と想定されていることから、本調査においては 2030 年～2050 年を想定した調査を行った。以下、これら 5 つの要因ごとの調査結果について、その要点を述べる。

2. 社会的要因 (Society)

まず、2030 年～2050 年を想定するにあたっては、世界の粗鋼生産量の予測と、スクラップの回収利用量の予測が重要となる。そのため、国内外の研究機関が行っている予測を調査した。その結果、2030 年には、18～23 億 t/年、2050 年には 22～28 億 t/年まで世界の粗鋼生産量は増加すると予想されているが、スクラッ

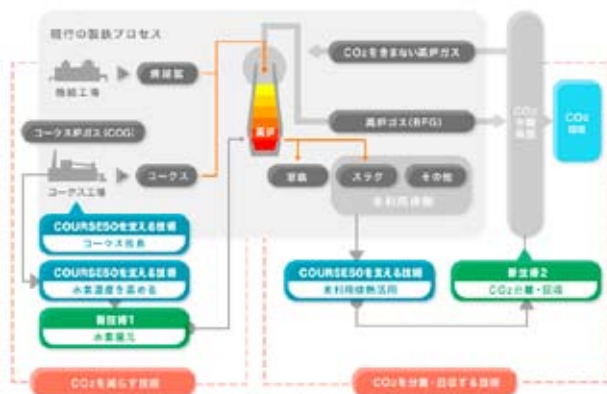


図 1 COURSE50 の概要^[1]

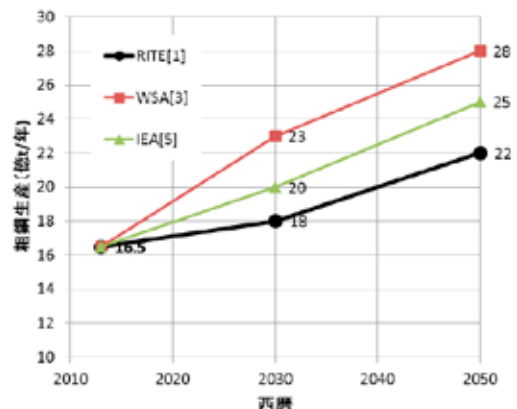


図 2 世界の粗鋼生産量予測 (文献 [2][3][4] に基づき作図)

プの回収利用量はそれ程増加しない（7億t、10億t）と予想されることから、世界で凡そ30%という現在の電炉鋼比率は大きく変化しないと想定される。

また、今後、粗鋼生産量が拡大する国として、インフラ整備を中心に、インドが想定され、CO₂の削減および省エネに対するインセンティブは大きくなると想定される。

3. 技術的要因 (Technology)

世界各国の転炉鋼の1次エネルギー原単位^[5]は、ロシア、ウクライナ、ブラジル、インド等が高い。これらの結果と粗鋼生産規模、転炉鋼と電炉鋼の比率等から、市場ポテンシャルが高い国・地域は、インド、中国が挙げられる。

一方、現在の高炉に依らない製鉄技術との比較・検討も行ったが、現在、実機稼働している技術の中では、生産性の規模等を考えると、高炉法を前提としたCOURSE50の優位性が際立つ。天然ガスをエネルギー、および還元剤として還元鉄を製造する技術は、石炭ベースの高炉法に比べてCO₂の削減ポテンシャルは大きいものの、最も普及しているMIDREX法でも全世界で数千万t/年の生産量であり^[6]、かつ、天然ガスの立地条件にも制約されるため、現在でも10億t/年以上にのぼる世界の鉄鋼需要を賄う上では補完的役割はあるにせよ、主力の製鉄プロセスに至ることは、困難である。また、石炭ベースのプロセスは、開発中のものも含め、いずれも最新鋭の高炉に比べて排出原単位は劣ると考えられる。

現在研究開発中の技術として注目されるプロセスに、欧州TATAがオランダのIjmuiden製鉄所でミニプラントを設置して開発中のHlarna法^[7]がある。本プロセスは、酸素ガスを使い、微粉炭燃焼とCOの二次燃焼反応 $CO + 1/2 O_2 = CO_2$ 熱を利用し、熔融鉄浴を生成する熔融還元法の1つである。排出ガス中のCO₂が90%以上であることを利用し、効率的な分離回収を前提とし、CO₂の削減効果が大きいと想定される。本法はまた、微粉の鉄鉱石、石炭を直接の原料とするため、従来の高炉法で必要な鉄鉱石の焼結工程やコークス製造工程が省略し得ることからも、省エネルギーの潜在的可能性は高い。今

後、デモプラントの建設を進めるとの情報もあり、注目される。課題は、高二次燃焼に伴う高温排ガスによる耐火物損傷対策と熱の利用にあるものと想定される。

その他、欧州で2004年～2017年まで推進されたULCOS (Ultra Low CO₂ Steelmaking) プロジェクトでは、その一環として高炉におけるトップガスリサイクル法（高炉排ガスのCO₂の分離回収および酸素富化）技術の開発を行ってきたが、中断されている。理由は不明確であるが、開発資金として当てる予定であった排出権取引の価格低迷によるとの情報もある。

4. 経済的要因 (Economics)

世界各国・地域における資源事情、港湾等のインフラ状況を調査した。まず、鉄鉱石の需給については、供給面、価格面では、安定した状況が続き、リスクは小さいと予想した。一方、図3に示すように、石炭では価格の変動リスクは大きいと思われる。さらに、高炉の稼働形態について、その規模を調査したが、中国、インドでは、小型高炉が多く、効率が低いと想定されること、また、インドについては国内に原料炭資源が乏しく、輸入に依存していることから、これらの国々では、CO₂削減に対するインセンティブが大きくなり、今後の高炉の統合、リブレースも勘案すると市場ポテンシャルは拡大すると推定される。

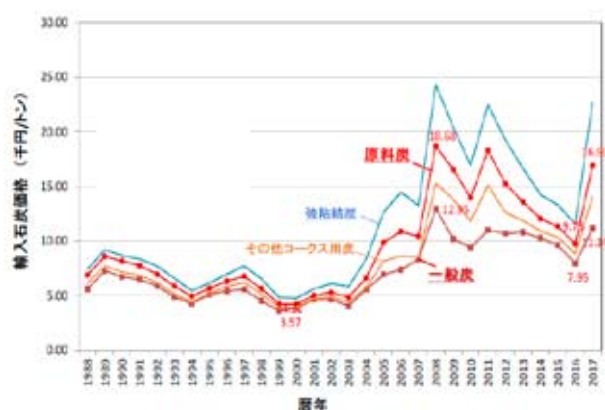


図3 輸入石炭価格の動向
(文献[8]に基づき、作図)

5. 環境的要因 (Environment)

国・地域別に、総CO₂排出量、および総エネルギー消費に占める鉄鋼業の寄与率を推算した。

エネルギーについては、中国、韓国では15%程度を占め、大きい。一方で、米国では電気炉鋼比率が高く、1%程度と推定される。また、エネルギー消費の鉄鋼業の寄与率もCO₂と同様の傾向を示した。

6. 政治的要因 (Politics)

パリ協定 (COP21) におけるCO₂の排出量削減目標 (努力目標) と、これまでの排出量実績から見ると、ロシアが既に達成見込みであるのに対し、他国の難易度は高いと推定される。

また、排出権取引制度や炭素税導入が欧州、中国の都市、韓国で進んでおり、これらの国、地域ではインセンティブが高まると想定される。特に、欧州はEU-ETSとして排出権取引の市場が形成されている。

表1 パリ協定に基づく各国削減目標

国	削減目標	基準年	達成目標年	CO ₂ シェア (2013年)
アメリカ	GHG 25~28%	2005年	2025年	16.5%
ロシア	GHG 25~30%	1990年	2030年	5.0%
中国	GHG/GDP 60~65%	2005年	2030年	29.0%
インド	GHG/GDP 33~35%	2005年	2030年	6.0%
ドイツ	GHG 40%	1990年	2030年	2.5%
フランス	GHG 40%	1990年	2030年	1.0%
韓国	GHG 37%	BAU(※1)	2030年	1.8%
ブラジル	GHG 37%	2005年	2030年	1.5%
日本	GHG 25%	2005年	2030年	4.0%

(※1)BAU: Business As Usual の意

7. まとめ

各要因ごとに、「COURSE50」及び「フェロコークス技術」の導入ポテンシャルを評価した結果を総合すると、中国、インドが高いと考えられる。インドは、今後のインフラ整備に伴う国内の鉄鋼需要増加が予想されるが、現時点では、政策面での排出権取引や炭素税といった規制の動きは無く、現時点でのニーズはそれ程大きくないと思われる。しかしながら、国内原料炭資源が乏しく、最近では輸入に依存している点、更に、国内の鉄鉱石が比較的品位が低く、大型高炉でも低効率な操業を強いられている点を考慮

すると、省CO₂プロセスに対するニーズは将来に亘って高まる可能性がある。インドを本拠とするTATAスチールが欧州でHIsarna法の開発を進める背景もここにあり、インドにおいての実機化を想定しているものと思われる。いずれにせよ、本プロセスの開発動向に今後も注目してゆく必要がある。

一方、既存プロセスの中では、天然ガスベースの直接還元法は、高炉法に比べ、元来CO₂発生原単位は少ないものの、生産規模が小さく、天然ガス立地制約もあるため、その普及は限定的と考えられる。

欧州では、2004年より製鉄プロセスのCO₂削減として、ULCOSプロジェクトが2004年~2017年まで進行していたが、現在では、HIsarnaの開発が後継的な位置づけとなっている。一方、本調査実施段階で、欧州での様々な模索の動きがあったが、最近、様々なCO₂ Break throughプロジェクトがアナウンスされている。これらのプロジェクトは将来ビジョンとしてCO₂削減率が80%~100%というレベルを目指すものであり、その技術的内容は、バリエーションに富んでいるが、欧州では政治的要因 (排出権取引等) も大きく、CO₂削減ポテンシャルが益々高まっていることの証左と思われる。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- [1] 日本鉄鋼連盟、ホームページ
- [2] RITE(地球環境産業技術研究機構) 成果報告 2010「脱地球温暖化と持続可能な経済社会実現のための対応戦略の研究」要約編
- [3] World Steel Association:The World Steel 2050 Report
- [4] IEA :Energy Technology Transitions for Industry, 2009
- [5] RITE2015 年時点のエネルギー原単位の推計 (鉄鋼部門-転炉鋼)
- [6] Midrex 社 : 2016 WORLD DRI STATISTICS
- [7] TATA Steel:ULCOS HIsarna IEAGHG workshop, Tokyo
- [8] 新電力ネット : 「石炭価格の推移 通関統計」

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 391 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2019年5月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6 階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp