



環境分野座談会

# 持続可能な社会に貢献する 鉄鋼業のあり方とは

資源利用に伴う地球環境問題を解決するために、資源生産性向上や材料技術研究への期待は高まっている。「鉄と鋼」第100巻を記念した環境分野座談会では、鉄鋼業と環境技術研究の今後のあり方や、産業エコロジー研究の役割について、研究者や技術者の方々に大いに議論していただいた。  
(2014年1月16日収録)

出席者(敬称略)

|        |                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------|
| 友田 陽   | 茨城大学 大学院理工学研究科 応用粒子線科学専攻 特任教授 [歴代部会長*] [2003~2004年度]             |
| 中村 崇   | 東北大学 多元物質科学研究所 教授 [歴代部会長] [2005~2006年度]                          |
| 秋山 友宏  | 北海道大学 大学院工学研究院<br>附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター長 / 教授 [歴代部会長] [2009年度] |
| 山本 高郁  | 大阪大学 大学院工学研究科 招聘教授 [歴代部会長] [2011年度~現在] (司会)                      |
| 川合 良彦  | 日鉄住金総研(株) 代表取締役社長                                                |
| 志村 進   | 大同特殊鋼(株) 取締役 機械事業部長                                              |
| 森口 祐一  | 東京大学 大学院工学系研究科 都市工学専攻 教授                                         |
| 松野 泰也  | 東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 准教授                                     |
| 松八重 一代 | 東北大学 大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻 准教授                                   |
| 中島 謙一  | (一社)日本鉄鋼協会 論文誌編集委員会 「鉄と鋼」第100巻特命小委員会 委員                          |

\*歴代部会長については、現在の「環境・エネルギー・社会工学部会」、および、その前身である「環境・エネルギー部会」、「社会鉄鋼工学部会」を含む。  
[ ]内は部会長の任期

## 鉄鋼分野における環境技術の変遷

**山本** 本日はお忙しいところをお集まりいただき、ありがとうございます。今回のテーマは、「環境」ですが、産業エコロジーなどを含めた広い視野から、持続可能な資源管理・地球環境問題の解決に向けて、鉄鋼業のあるべき姿、鉄鋼業に求められる転換、

そして日本の鉄鋼業の果たすべき役割について議論したいと思っています。はじめに、議論の背景を少し整理して、共有しておきたいと思います。中島先生から簡単にお話いただけますか。

**中島** 1972年に、地球の有限性や環境容量という考え方を、ローマクラブが『成長の限界』の中で示しました。90年代頃からはライフサイクルアセスメント(LCA)あるいはライフサイクル思考の

浸透と、さらに材料・製品のエコマテリアル化という議論も出てきました。そして、LCAによる環境問題解決のための全体最適化という話が出てきたのもこの時期からです。このような流れに対して、公害問題、エネルギーショック、廃棄物問題、近年での地球温暖化、あるいは資源の劣質化など、さまざまな課題を解決する技術イノベーションが行われてきました。その中で、日本の鉄鋼業は、技術転換と駆動力、特に世界的に優れた環境適合型の鉄鋼技術を確立してきました。近年のキーワードとしては、資源拡充、高効率生産、低炭素化、エネルギー弾力性向上、ゼロ・エミッション化、エココンビナート化などを挙げることができます。まず、エココンビナートについて、秋山先生からご説明をお願いします。

**秋山** まず、日本のエネルギーバランスフローを見て、私たちに何ができるかを考えてみます。日本のエネルギーは、石油、石炭、天然ガスや、原子力、水力、新エネルギーなどで構成されます。こうして入ってきたエネルギーは電気や各産業、民生分野などに使われます。このエネルギーは最終的に、物質にエネルギーとして蓄えられますが、一方で排熱が伴い、全産業平均で約半分が排熱で出ていきます。ということで、私たちの取り得るエネルギー戦略は3つあり、1つ目は流入エネルギーのマネジメント、2つ目はエネルギー変換効率を改善するような技術開発をどんどん推進すること、3つ目は排熱・廃物を回収あるいは循環するような技術開発です。エネルギーを見るときに、実は「エクセルギー」という概念が非常に重要です。鉄鋼業は1,500℃以上の排熱が存在しているので、これを回収・輸送することができれば、大幅なエネルギーの節約が可能になります。つまり、エクセルギーで評価すると、鉄鋼業は主役になれるポテンシャルを持っているわけです。このような評価から、環境・エネルギー・社会工学会では、理想的な姿として、製鉄所をハブとする「エココンビナート」を構想しています。これによって、熱のみならず物質のカスケード利用を実行することにより、民生、産業、発電、運輸が多次元的に結びつくことが可能になると考えています。

**志村** 私の専門であるエンジニアリングの視点では、日本は鉄鋼業の技術を非常にうまく活かしていると思います。特に顕著なものは、ごみや下水の処理などの社会インフラの分野です。大規模な施設に対して、鉄鋼の生産プロセスで培ってきた総合エンジニアリング技術が非常に有効です。具体的な技術では、高炉技術を転用した都市ごみのガス化溶融炉や、アーク炉、抵抗炉を使った都市ごみ焼却灰の溶融炉などで、数多くの実績があり、鉄鋼業、鉄鋼技術が環境に貢献しています。さらに、海外でも中国やASEAN地域のごみや下水処理などで、こういった日本の技術へのニーズがあります。欧州でも、ここ数年間で焼却プラントに日本の技術が導入されていると聞いています。欧米では、ごみというのはもう明確に、発電のための燃料であるという概念があります。そのようなWaste-to-energyの効率は、かつての



(司会)  
**山本 高郁**

大阪大学  
大学院工学研究科  
招聘教授

欧州やアメリカが持っていた技術よりも、今ははるかに日本の技術のほうが優れているのではないのでしょうか。

**友田** 歴史を振り返れば、1972年の『成長の限界』から20年後の1992年には、続編の『限界を超えて』が、すでにオーバーシュート状態になっていると警告しました。ちょうどその頃に、科学技術振興調整費でエコマテリアル研究会が立ち上がって、優れた材料が必ずしも好ましいのではないという、新しい座標軸を材料の研究に取り入れるべきだ、ということを提言し始めました。それが徐々に浸透して、金属学会や材料学会、いろいろな学協会に環境関係、エコマテリアル関係の部会ができるようになりました。社会鉄鋼工学部会では2003年から2004年に部会長を務めました。環境関連のシンポジウムを開催したり、ロードマップを作成しました。この頃鉄鋼協会で環境研究をしていることをさらに外部から見えるようにしたいということで、環境・エネルギー部会ができました。当時、環境関係に取り組む方々は、すでに企業で大きな仕事をされた方が多く、若手が少ない。そこで環境をテーマとしたヤングサイエンティストフォーラムをスタートさせたところ、若手がオリジナルなアイデアを出し、活動を牽引することが非常に大事だと感じました。また、環境を専門とする人だけではなく、一般の研究者自身がそれぞれ環境、資源を意識しながら研究を進めるようになってるのが、特にこの20年間の非常に大きな変化だと思います。

## 世界的なLCAの評価基準の整備

**山本** これまでの議論でLCAやエネルギー収支など、いくつかの評価基準の話がありましたが、鉄鋼分野ではすでに世界的な評価基準作りを行っていますね。

**川合** 世界の鉄鋼業の取り組みとしては、当時のIISI (International Iron and Steel Institute、現 World Steel Association) が、1996年に世界の鉄鋼メーカーが統一した計算の手法で、鉄鋼業のLCI (Life Cycle Inventory) 調査を始めています。



## 松八重 一代

東北大学  
大学院工学研究科  
金属フロンティア工学専攻  
准教授

1回目のデータ構築では、多くのIISI加盟メーカーが参加して、データを提供しました。程なく日本鉄鋼連盟も98年に鉄鋼連盟の中の技術政策委員会の中にLCA検討ワーキンググループを発足

しています。現在まで、日本の鉄鋼業は地球規模で環境問題に貢献していくということを目的として、エコプロセス、エコプロダクト、エコソリューションという3つのエコと、「COURSE50」などに代表される革新的技術開発という、4本柱で取り組みを行っています。

**松野** 私自身は、エネルギーから素材、ビール、電気自動車、そしてITなど、これまで18年間にわたってLCAに関わってきました。私が鉄鋼協会に入会した2001年頃は、循環型社会形成推進基本法が施行されたこともあり、素材のライフサイクルというのが少し見えにくくなってきた頃でした。多少乱暴な言い方をすると、使い捨て社会では、素材を作って、使って、捨てるので、その環境負荷を比較的精度よく評価できます。しかし、循環型社会ではそれが難しくなります。素材の環境負荷とは一体何だろう、という根本的な質問に対して、答えにくくなってきます。特に鋼材という素材は、社会で非常に長期間使われて、ストックされるという特徴があります。そのため、環境負荷を考え

### ■リサイクル・廃棄物処理を支える鉄鋼・環境プロセスの例



鉄スクラップ (写真:(一社)日本鉄鋼連盟 HP「フォトギャラリー」、撮影:西澤丞氏)



アーク式電炉 (写真:(一社)日本鉄鋼連盟 HP「フォトギャラリー」)



アーク式灰溶融システム (写真提供:大同特殊鋼(株))



回転床炉を用いたダストリサイクルプロセス (INMETCOプロセス)  
(写真提供:大同特殊鋼(株))

る際には、非常に長いスパンで、さらに世界という広い地域で考えていく必要があります。各年において素材の環境負荷は、社会におけるストック量やリサイクル率によってもいろいろ変わってきます。鉄のLCAの評価手法を確立して、コンセンサスを得て、さらにほかの素材と一緒に議論するまでには、まだまだ時間がかかるでしょう。しかし、今後とも取り組まなければならない課題であると、感じています。

**松八重** 私はこれまで、廃棄物の排出と再資源化について、産業連関モデルを基盤とした経済学の視点で分析してきました。自分自身を振り返ると、研究者駆け出しの頃は、鉄とは、車に使われている鉄も、建設に使われている鉄も、缶に使われている鉄も、みんな同じ鉄で、利用後に排出された鉄はみんな電炉でリサイクルされて同じ素材として循環していると考えていました。しかし、鉄鋼協会で研究会やフォーラムに参加をしつつ、研究仲間と議論を進めていくことで、鉄の素材としての裏側に背負っている環境負荷や、ライフサイクルにおける環境負荷排出などは、実はそれぞれの生産プロセスによってまったく違うのだということを理解しました。こういうことは、産業エコロジーやLCA分野に関わる研究を行う上で非常に重要な気づきであると思います。環境教育を行う際にも、早い段階で「物のつくり方」ということをきちんと理解する必要がある、と感じています。

**森口** 私の中では、産業連関分析もマテリアルフロー分析もLCAもほとんど同じようなもの。というか、同じではないのだけれども、それを一緒にとらえないと、あまり意味がない、という思いがあるのです。これを分けようとするのは、無理があるのではないかと、ということです。先ほど指摘があったように、産業エコロジーには、現場を知らずに机上でいろいろな計算をしているだけでは意味がない、という課題があります。また、素材別の評価も異なります。現在、産業構造審議会では、経団連の温暖化対策の自主行動計画のフォローアップを業種別にやっています。さまざまな産業分野が力を合わせることができれば、日本全体としてここまでエネルギーや資源の消費を下げられるのだと、もっとポジティブに考えられるようになってよいと思います。

**中村** 産業界でLCA研究をするなら、最初は鉄ベースで始めるのが一番いいのではないのでしょうか。データも揃っているし、国際的な組織もあり、それが広く認識されています。そういった取り組みや評価結果をきちんと発信することが、今後はますます重要になってくると思いますね。

## 環境制約・資源制約と日本鉄鋼業の対応

**山本** 近い将来、日本の鉄鋼業で深刻化が懸念されるような資源制約や環境制約はあるのでしょうか。

**中村** 鉄の環境制約については、ほとんどがCO<sub>2</sub>の排出量



志村 進

大同特殊鋼(株)  
取締役  
機械事業部長

で、あとはソルトパーティクルのハンドリングの問題です。すでに成果が出ていますので、ぜひそれをさまざまな分野に応用していった欲しいと思います。資源制約に関しても、鉄は比較的小さいと考えています。鉄鋼メーカーにとっては、近年の鉄資源の劣悪化は相当深刻ではないかと思うのですが、ほかの鉱物資源と比較すると、鉄にはまだ随分余裕があります。鉄が影響を受けるのは、鉄鉱石そのものよりも、エネルギーではないでしょうか。私が今一番気にしているのは、シェールガスの存在です。アメリカで、シェールガスを使いながら、ちょっと品位の低い鉄鉱石をむりやり還元して、電炉で溶かして良質なスチールをつくるというのは、見かけのCO<sub>2</sub>排出量を減らすことができ、素人から見ると非常に魅力的に見えるのです。

**川合** シェールガスを使った直接還元鉄(DRI)などの製鉄プラントというのは、高炉と比べると生産性が低いので、せいぜい年間100万tとか、大きなものでも年間200万tくらいの生産量に留まると思います。高炉の生産量は桁が違って、何百万tも生産できます。ですから大量に鉄をつくらなければならないのであれば、やはり高炉が必要なのです。高炉本体は基本的にシンプルな円筒形状ながら連続還元と溶解まで可能な向流型熱交換装置という長所に、原料成分調整や装入物分布制御など高度な操業技術が加わり、高い生産性を担保できていると思います。

**志村** 特殊鋼の製造プロセスでは、まだ、シェールガス起因の還元鉄という話題は、あまり無いようです。鉄源の確保という点では、今後もしばらくは、スクラップ流通の中で鉄源を確保していくということが基本になるのではないかと考えています。

海外のニーズに対する我々の対応についてですが、鉄鋼業におけるエンジニアリング技術という切り口では、公共インフラのごみ処理や下水処理のプラントなどで、中国やASEANのニーズに日本の技術が応えています。もともと日本では、1970年代以降ヨーロッパの技術を導入してプラントを建設してきましたが、最近10年ぐらいはプラントエンジニアリングの実力がかなり上が



## 中村 崇

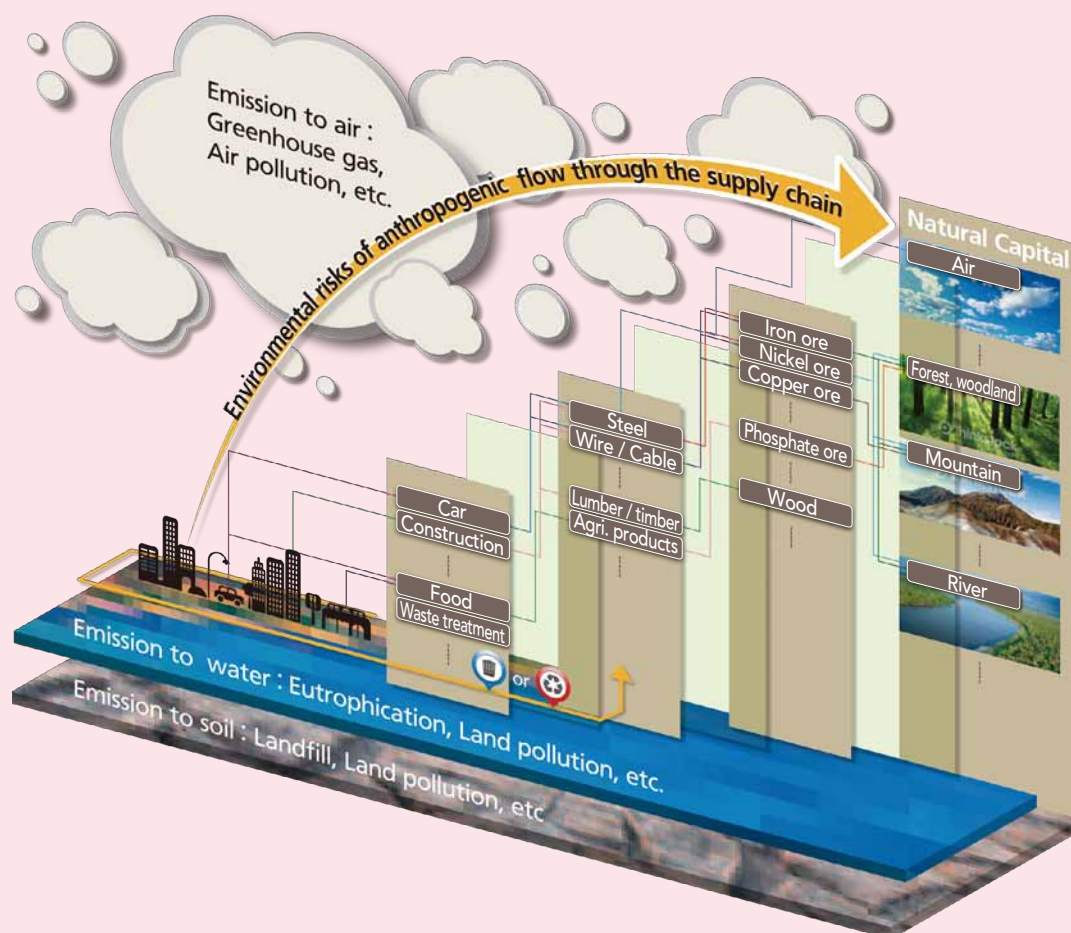
東北大学  
多元物質科学研究所  
教授

り、欧米を凌駕するようになっていきます。こういう技術の発信に対する障壁や制約ということでは、特にアジアではニーズがあっても現地の社会的な基盤が不十分であったり、コスト意識に差があったりします。現在のやり方は、日本は基本的な設計技術や重要保安部品、それと監督者を担当し、現地側はそれ以外の詳細設計、製造、組立、据付、試運転を担当して、両者がタッグを組んで進めていく、というような手法が多くなっています。

**松八重** 日本の鉄鋼業は、資源のほとんどを海外からの輸入に依存しているので、資源利用の効率向上に注意を払ってきたと思います。特殊鋼に使われるような希少資源は枯渇性や採掘・製錬に関わる環境負荷も考慮すると同時に、今後はさらに踏み込んでその利用に関わる文化・社会的影響、生態系への影響についても考えていく必要があると感じます。一方で、日本でCO<sub>2</sub>排出を軽減しているのは、熱効率を高める耐熱鋼や、自動車の軽量化に役立つ高張力鋼の導入といった素材のもたらす貢献が大きいという点をもっと積極的に発信すべきです。LCA研究者は、サプライチェーンを通じて資源の利用やそれに伴う環境負荷を明らかにすることにより、新たな素材革新技術が社会に対してどういう変化をもたらしたのか、という情報を提供する役目があると思います。しかしながら素材革新技術が製品に組み込まれることで環境負荷軽減、資源消費削減その他の波及効果がどれほどあるのかという点については、一般の人たちにはなかなか伝わっていないという気がします。

私は現在、JST(科学技術振興機構)のRISTEX(社会技術研究開発センター)の下で、科学技術イノベーション政策のための科学という研究開発プログラムに参加しています。以前、

■ サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の概念図(図1)



政府の科学技術イノベーション戦略に関する会合に出席した際に、素材産業の果たす役割についてあまり重要性が理解されていないのではないかと感じたことがあります。日本のさまざまな製品技術開発を下支えする素材にはどのような革新技術が必要なのか、素材技術におけるイノベーションは製品開発にどのような貢献をもたらしてきたのかという視点がありませんように感じられ、その重要性をエビデンスに基づいて示すことができない自分自身の力不足に歯がゆい思いをしました。そのような思いがあり、今はリソースロジスティクス可視化に基づくイノベーション戦略策定支援を掲げたプロジェクトを推進しているのです。

環境制約や資源制約という点では、日本の鉄鋼業は、他の産業に比べれば受ける影響が少ないという指摘がありましたが、逆に日本の優れた鉄鋼業の技術が、他の産業に与える影響は大きいのではないかと考えます。1つの例として、リンの問題を挙げることができます。欧米でのリン資源に対する関心は非常に高く、将来における人口増大と、それに対する十分な食料供給ならびにエネルギー作物生産に必須の農業用の栄養塩類の確保は各国とも戦略的に行う必要があるという姿勢を見せています。マテリアルフローの視点から日本のリンの流れを見ると、リン資源は鉱石として輸入しているのとほぼ等しい量が、鉄鋼スラグとして排出されていることが非常に特徴的です。鉄鋼業における脱リンは言い換えれば、非常に薄く広く鉄鉱石あるいはコークスの中に含まれているリンを、スラグの中に濃縮しているわけです。微量なリンを含む鉄鉱石とコークスを利用する高炉・転炉法での製鋼が大規模に行われている国では同様にスラグ中にリンが濃縮拡散していることが予想され、その意味では中国、インドにおいても大きなリンの流れが鉄鋼生産に随伴して発生していることが予想されます。中国、インドは人口増大、食料需要の増大が見込まれる国であり、肥料の需要も今後いっそう高まるでしょう。おそらくスラグ中のリンを介して鉄鋼業と農業をつなぐ技術はアジアにおいて重要になってくると考えます。



森口 祐一

東京大学  
大学院工学系研究科  
都市工学専攻  
教授

スラグ中のリン資源のリサイクル研究は、鉄鋼協会の研究会で取り組みが始まったところですが、日本以外の国では鉄鋼スラグが潜在的なリン資源になりうることについては、まだまだ認識がない状態です。つまりリンの問題については、世界全体が抱える今の資源制約に対して日本の鉄鋼業が大きく貢献できるのではないのでしょうか。

**山本** リサイクルを考えるとときには、技術だけではなく、運搬の問題が非常に大きいですが、その視点が欠落していると感じています。鉄は非常に量が多いので、それぞれの地方でそれほど移動させる必要はないでしょうが、レアな素材になってくると、全国で1カ所あるいは2カ所に集める必要があり、全国的なネットワークが必要になると思います。

**中村** 環境を考える際には、エネルギーバランスやエネルギー収支という「物差し」がよく使われます。しかし、そこには「物質」が密接に関連していることが、見落とされがちです。その点は非常に不満で、エネルギーモデルにもマテリアルフローの視点を導入する必要があると思っています。例えば、エネルギーの最適化モデルでは、「ある地域では、どのようなエネルギー発生源を、どのように利用するのが一番効率的か」という最適化を

## ■産業エコロジー研究を代表する書籍(図2)



### 産業エコロジーの概念

“Industrial ecology is the means by which humanity can deliberately and rationally approach and maintain a desirable carrying capacity, given continued economic, cultural, and technological evolution. The concept requires that an industrial system be viewed not in isolation from its surrounding systems, but in concert with them. It is a systems view in which one seeks to optimize the total materials cycle from virgin material, to finished material, to component, to product, to obsolete product, and to ultimate disposal. Factors to be optimized include resources, energy, and capital.”

(出典：T.E.Graedel and B.R.Allenby: “Industrial Ecology”, AT&T. Prentice-Hall, (1995), 9)



## 川合 良彦

日鉄住金総研(株)  
代表取締役  
社長

考えますよね。その際に、物質の視点が入らないから、非常に美しいかもしれないが、物質を考慮していないので、現実とはまったく一致していない、ということもあります。こういうリアリティのあるモデルの構築を研究するならば、他の学会よりも鉄鋼協会が一番適しているように思います。

**森口** 私は、資源制約という言葉は、資源の物理量として地球上にあるかないかという話ではなく、いわゆる経済、マーケットの話も含めた供給制約であり、国産で資源があるかどうか、輸入依存が高いか、資源採掘時の環境問題なども関係すると思います。また、環境制約では、エミッションや廃棄物側の制約なのか、資源調達側での環境問題を含めた問題なのか、といった点まで含まれます。日本は相対的に資源制約が厳しい国だと思うのですが、それはあまりネガティブにとらえるべきではないと考えています。それをバネにして、むしろそれを強みにしていくということが非常に重要だと思います。かつて自動車排ガスに対する非常に強い規制に日本の自動車メーカーが対応しようとしたことによって、自動車産業の国際競争力が高まったという例があります。

**山本** あるとき気づいたのですが、銑鉄も鉄板も、同じ鉄としか見ていない人が多いですね。一般の人だけでなく、官公庁などでもそう思われている。だから、鉄は先端産業だと言ってもわからず、そのうち研究室の数が減り、興味のある人が減っていきまいます。もっと宣伝しなければいけないのではないのでしょうか。

**中村** ごく狭い意味の資源制約では、鉱山についてあまり理解していない人が多いと思います。世界の大手の鉱山会社は大手なので、とてもしっかりと環境対策や教育、周囲へのケアを行っている。そういうことをきちんと理解しないといけないと思います。

**中島** 資源の消費量を減らし、環境への負荷を減らしながら、同時に豊かな社会を実現していく「デカップリング」というのは、難しい取り組みですね。

**森口** 「デカップリング」という語はネガティブなイメージがあり、もっとよい言い方がないものかと考えているところです。これは

むしろ、離すことがいいことだというポジティブな意味を込めていて、経済活動とかGDPで代表されるような豊かさは右肩上がりしつつ、資源の利用量や、それに伴う環境への悪影響をどう下げていくか、という概念なのです。デカップリングの概念には、「人間の幸福」も含まれています。鉄に関して言えば、鉄をつくることによって、あるいは鉄を使うことによって一体どういう意味で豊かさや、幸福、よい暮らしの実現に貢献しているのか、という点についても考える必要があるということです。日本にとってもそうですし、鉄の輸出先でも構わないと思いますが、どのような将来像があるのか、ということを確認していくことが必要だと思います。

**川合** 鉄鋼業の取り組みとして先ほどお話しした3つのエコは、いずれも重要な柱ですが、日本政府の攻めの温暖化対策に資するという意味では日本の鉄鋼業の持っている省エネ・環境技術で世界に貢献することを目指していることから、日本の優位性が一番高いのは、エコソリューションだと思います。つまり、日本の優れた省エネ技術などを海外に技術移転することです。代表的なものはコークス炉の乾式消火設備、高炉炉頂圧発電などです。全世界のCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルは約4億t(2009年)といわれますが、日本の技術を移転することによって4,000万t削減でき、2020年度には7,000万t削減のポテンシャルがあると見られています。2006年にはAPP(Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate)ができ、日本、豪州、中国、インド、韓国、米国の6か国が参加し、後にカナダも入って、技術移転の取り組みが始まり、その後も各国間でエネルギー効率向上を狙いとした国際的な枠組みの中で、技術移転が進められるようになっていきます。一方で、技術移転の妨げになることとして知財の問題があります。例えばハイテンでは、使用する側の国ではエコプロダクツになるが、製造上のノウハウは簡単に教えるわけにはいきません。それから関税がバリアになることもあります。またエネルギーに対する補助金の問題もあり、補助金で電力価格を低く抑えたとなると省電力インセンティブが下がってしまいます。またヨーロッパのCO<sub>2</sub>排出量取引制度のCO<sub>2</sub>カウントの仕方では、鉄鋼会社から出される直接排出だけカウントして、購入している電力に付随するCO<sub>2</sub>(間接排出)はカウントしない。このような、仕組みの上での問題は、民間企業だけではどうしようもないので、国のレベルで解決しなければならない問題だと思います。

## 産業エコロジー研究におけるマテリアルフローの重要性

**山本** 次に、持続可能な社会の実現のために、産業エコロジー研究の役割として何が必要とされているのかについて、議

論を深めていきたいと思います。

**森口** 実は「産業エコロジー」という言葉は、日本人が最初に提唱したとされているのですが、「産業エコロジー」という言葉自身が、なかなか日本で正確に理解されていないところもあります。日本では、しっかり研究をやっている割には、外に向けてアピールするのが下手でもっとよいプレゼンテーションをするべきなのです。日本にはエコタウンのように、地域の中にある事業所間のつながりをうまくインテグレートしていく活動があります。これはインダストリアル・シンバイオシスと呼ばれ、国際的な産業エコロジー研究の中でメインストリームの1つになっています。日本のエコタウンは廃棄物が中心になっていますが、動脈側である素材産業にかかわる部分、例えば鉄鋼の副生ガスや排熱の融通など、いろいろとよいところがあると思います。こういうよい例を、国際的にうまく売り込んでいくことが大事だと思います。産業エコロジー研究のメインストリームは欧米だったと思いますが、最近は韓国や中国も熱心に取り組んでいる。日本も、アジアのマーケットを意識して、上手に発信していくことが必要だと思います。

**中村** 小型電気電子機器のリサイクルを始めるときに経験したことです。コンセンサス会議では一般の市民の方を相手に、専門家が説明をするのはとても手間がかかります。しかし、LCA・産業エコロジーは、専門家だけの中で閉じてしまうことは



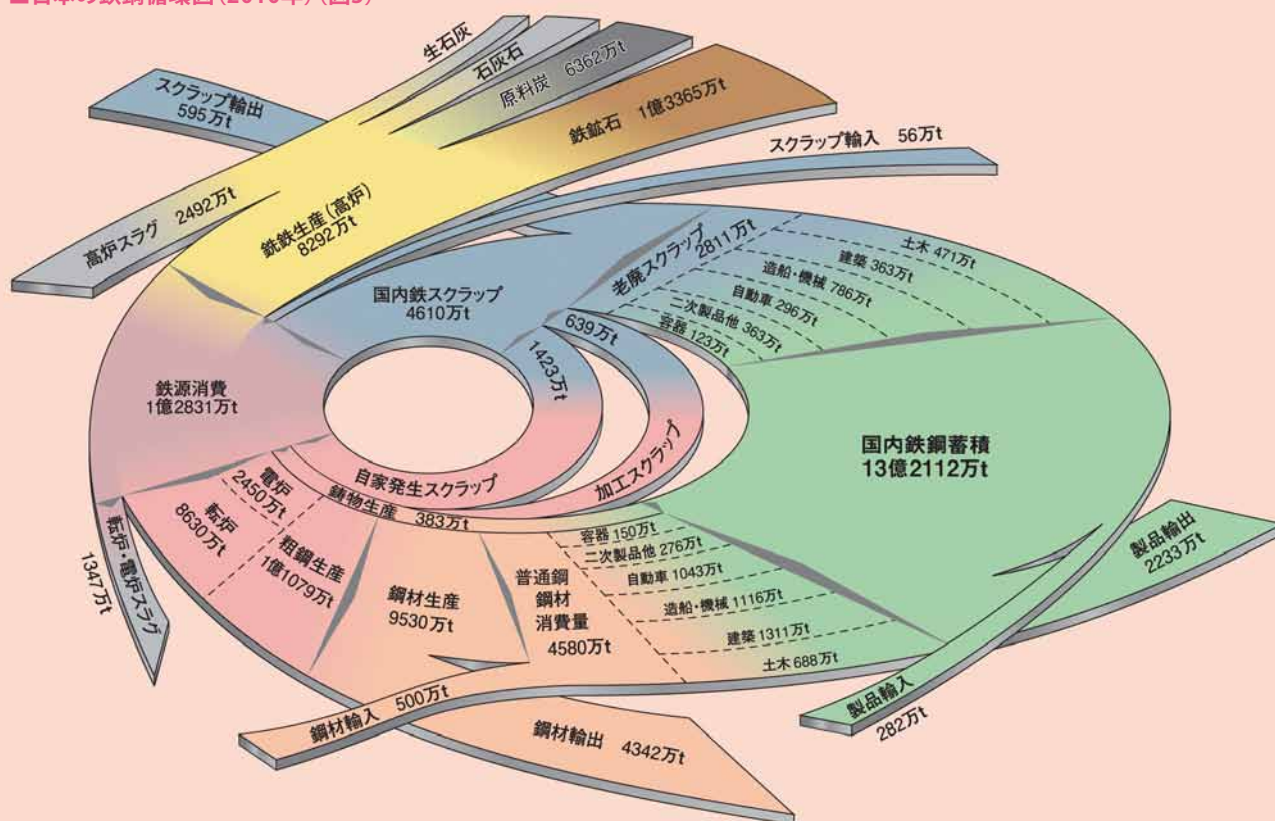
松野 泰也

東京大学  
大学院工学系研究科  
マテリアル工学専攻  
准教授

避けるべきです。そこで、コンセンサスの形成には、学会という形式の方が適しているのではないかと考えています。また、データベースは、なるべくオープンで、ぜひしっかりつくるという努力をしていただきたいと思います。

**松野** 私は、マテリアルフロー分析もLCAの中の1つではないかと考えています。「日本の鉄鋼循環図」(図3)というのがありますが、皆さんはもう見なれてしまって、そんなに感動しないと思います。しかし、私が鉄鋼協会に入会した2001年に、A3サイズのこの図を初めて見たときには、震えるような感動を覚えました。

■日本の鉄鋼循環図(2010年)(図3)



(出所: (一社)日本鉄鋼連盟)



## 友田 陽

茨城大学  
大学院理工学研究科  
応用粒子線科学専攻  
特任教授

「見える化」というのは、こんなにも威力があるのか、と感じました。それ以後、この世界に邁進していったというわけです。鋼材は金属の中で、世界で最も多く使われる素材です。この鋼材を基軸にマテリアルフローを作ると、そのほかの元素とのリンケージもおのずと明らかになり、リンケージについても議論できることが、自分で研究を進めていて興味深く感じています。このマテリアルフローから将来の、何年に、どこで、どれだけのスクラップが発生するのか、そういうことがある程度推計可能になります。今後は2050年に向けてどれくらいそのスクラップを活用すべきなのか。また、不純物を含んでいても良質の鋼材をつくることのできるようなプロセス開発や材料開発など、産業エコロジー分野から発信できるメッセージは少なくありません。この中のいくつかのテーマでは、鉄鋼協会の研究会でも取り上げられています。マテリアルフロー分析は今後も取り組んでいくべき重要課題だと考えています。

**松八重** 私も「日本の鉄鋼循環図」を見たときに、スケールの大きさ、図としてのデザイン、情報量の多さなど、非常に優れた図だと感じました。先ほどのお話にあったように、鉄の流れには随伴するさまざまな希少資源の流れがあり、特に日本では特殊鋼生産量が多いこともあり、多くのニッケルやクロム、亜鉛なども流れているのです。しかし老廃スクラップについて言えば、上工程で元素の混入について厳格なまでに注意が払われているのに比べ、下工程ではそこまでの配慮がなされていない。「鉄くずは所詮鉄くず」という考え方から、「鉄に随伴しているのはクロムなのか、ニッケルなのか、それともモリブデンなのか」といった観点を加え、スクラップを鉄源であると同時に、希少資源のキャリアとして見ていくことが今後さらに必要になるのだと考えています。

これは鉄鋼業界へのお願いなのですが、鉄鋼生産に関わる希少資源の流れや、スクラップ利用の実際についての情報を産業エコロジー、LCA研究者に対してもっと提供していただきたいのです。そして産業エコロジー、LCA研究者をもっとうまく

使って、我が国の優れた鉄鋼技術がどれほどの便益を生み出しているのかを発信するために、ぜひ役立てていただきたいのです。産業エコロジー、LCA研究者と協同で素材技術の革新がライフサイクル視点で見たときに、どこでどれほどの環境負荷軽減に寄与したのか、天然資源利用効率の向上に貢献したのかを定量的に明らかにすることは、日本の技術のプレゼンスを上げるところにも役立つのではないかと考えています。

**友田** 鋼材にはきちんと名前があるからどういう履歴があるかわかりますが、一度スクラップになると名前がなくなってしまいます。鉄鋼の細かい成分はノウハウのかたまりなので、それを明らかにするのはなかなか難しい。プラスチックのように、ある程度ラベリングされて、分類されてリサイクルできるようになると、もう少し効果的な提案をすることができるということですね。

**川合** しかし、worldsteel (World Steel Association)でさえ15品種しか分類していないのが実情です。例えば薄板には、軟鋼もあればハイテンもあります。板厚でも、厚いものもあるし、幅の広いものもあります。それでもデータ上はすべて「薄板」として集計されて、平均値としてデータが出されています。LCAの精度を見ると、worldsteelの方法でもせいぜい±10%ぐらいであり、例えば日本の鉄鋼メーカー間で比較した場合、その中に個々の製鉄所の差が入ってしまうのです。またハイテンのようなデータはどこの会社も出したくないですし、worldsteelのLCIの方法論で差別化するのは難しいので、ほかの方法を考えるしかないと思います。今、世界の鉄鋼メーカーの間で問題になっているのは、欧州の環境フットプリントという制度で、温暖化やオゾン枯渇のみならず14項目にも及ぶ環境影響因子を対象とするというもので、これらの評価には大変な労力を要することになります。しかも、リサイクリング効果を評価する方法として、リサイクリング・コンテンツ50%/End-of-Lifeリサイクリング50%という方式を採用しているので、End-of-Lifeリサイクリングに対しては50%のクレジットしか与えられないことになります。ちなみにworldsteelの方法論では、フル・クレジットが与えられます。さらに、エネルギー回収についてはフル・クレジットを与えるという評価方法になっていますので、いろいろな素材を回収するのにエネルギーとして回収する方がクレジットが高く評価されることになってしまいます。他にも、GHGプロトコルという算定法も使用され始めており、世界でいろいろなルールがあって、鋼材を利用する顧客（業界）がいろいろな算定方法に基づくLCIを鉄鋼メーカーに要求してきます。一般の人には各方式の差異が理解しづらいため、混乱をきたすおそれがあります。

**中村** 私のように非鉄をやっていると副産物がたくさん出てきますが、それぞれのアロケーションの方法を、多くの人が納得できるような方法論があるとよいと思います。

**森口** 産業連関分析も同じような問題があります。例えば、石

油精製に投じたエネルギー消費の目的は何か、と考えたときに、どう評価すればよいでしょうか。重量で重みづけを行うと、重油に重く配分されます。しかし、実際のエネルギーはもっと軽い、付加価値の高い製品のために投じています。その点では、マテリアルフローはきちんと計算ができますね。

**秋山** その計算をするときはいつも同じ悩みを抱えていますね。今は重量で考えるのが一般的だと思うのですが、その先はエクセルギーで考えていただきたい、というのが個人的な希望です。

**松八重** LCAのパウンダリを鉄鋼業界とかセメント業界というように切ってしまうと、パウンダリの曖昧な領域で発生する環境負荷をどちらが背負うかという点が問題になってきます。そのため日本全体でどんな物がどれだけの量が流れているのかを鳥瞰的な視点で捉えた上でなければ的確に環境負荷の配分を行うことはできません。鉄鋼業に関しては、ほかの産業に比べて非常に情報が多いとはいえ、産業エコロジー研究者として希少資源のフローに関してはより詳細を知りたいと思うプロセスは多々あります。そして、それを知れば、もっと具体的な提案ができるのに、と思うところがたくさんあります。鉄鋼連盟や鉄鋼協会などで、さまざまな鉄鋼技術情報を活用できる場を設けていただければ、もっと研究が進むと考えています。

## 次代を担う若手技術者・研究者への期待

**山本** 最後に、次代を担う若手技術者・研究者への期待について、コメントをお願いします。

**川合** 企業から見ると、環境エネルギーに関わる人は、世の中でどのような環境問題が起こっているか、鉄とはどのように関連しているのか、各国の鉄鋼技術のレベルはどうなっているのか、といった広い知識がますます必要になると思います。ベースになるLCAや産業エコロジーの知識を身につけながら、そのような広い視野を持った人が必要とされていくと感じています。

**志村** 企業にとってグローバル展開が喫緊の課題だと言われていますが、それは我々エンジニアリング業界でも同様です。グローバル展開という観点では、海外のプロジェクトなどに対しても、物おじしないような人材が必要です。また、日本のサステナブルなものづくり力を維持していくために、大学教育においても、日本のものづくり、製造業に愛着を持って、活躍できる人材を育て続けていただきたいと思います。

**友田** 大学にいて、これは環境や鉄鋼に限ることではないと思うのですが、学生があまり感動したことがないのではないか、ということを最近特に感じています。もう1つ思うのは、勉強をする目的意識が希薄だということです。それに対して大学は、いかに早くそういう感動を与え、現場と早い時期につながりを持ち、



秋山 友宏

北海道大学  
大学院工学研究院  
附属エネルギー・マテリアル  
融合領域研究センター長／  
教授

目的意識を持たせるか、これが工学部の教育だと思います。今、2、3年生の学生がチームを作り、企業に行き、生産現場の問題を現場の人たちと一緒に考える、という試みが始まっています。実際に現場の方々や議論すると、興味を持って取り組む学生が現れます。そのような学生は、その後非常に伸びるという印象があります。そういう意味では、今の若い人に期待することは多く、頼もしいとも思っています。

**中村** もう少し企業と大学の間の人材交流を活発にできればいいですね。企業で活躍して、大学に来られる方は多い。しかし、大学で助教を勤め、その後製造業の現場に行き、また大学に戻ってくる、という方がいないのです。日本の今のシステムでは、それはできないのです。ところが、海外はそれを行っています。そういうシステムを教育現場でつくることであれば、それが教育現場にリアリティを持たせる1つの大きなポイントになるという気がします。

**秋山** 私は、大学院の自分の講義で、「エネルギーは消費されますか」という質問を最初にするにしています。すると、半分ぐらいの学生が熱力学的には間違っ「エネルギーは消費できます」と答えます。考えてみると、子供の頃から「エネルギー消費量」という誤った言葉に触れているわけです。だからそれを「エネルギー投入量」や「エネルギー流入量」という言い方に替えるか、あるいは「化石エネルギー消費量」であれば、理解できる。そのあたりの教育から見直さなければ、流入エネルギーの回収や、物質に蓄積されたエネルギー、エクセルギーなどの概念をきちんと理解できないのではないかと思います。そういったエネルギーについての基本的な教育システムの見直しが必要だと思います。

**森口** 私は、行政にも携わり、国立研究所に務めた後に大学に来るという、少々変わったキャリアパスを歩んできました。これは、コンプレックスもありますが、強みでもあると考えています。自分のようなキャリアパスで得られるものを、うまく大学教育の中でもアピールしていかなければいけない、と思っています。最近、



## 中島 謙一

(一社)日本鉄鋼協会  
論文誌編集委員会  
「鉄と鋼」第100巻  
特命小委員会 委員

(独)国立環境研究所  
資源循環・廃棄物  
研究センター  
主任研究員

強く感じていることは、日本は中途半端に大きな国で、日本語の世界だけで論文が書けていた国だったということで、これが国際化の大きな妨げになっていました。オランダやスウェーデンのように、自国語だけでは勝負しにくい人たちは、とても国際的になります。日本は、この中途半端な大きさが、これから弱みになるのではないかと懸念しています。これは個人個人の責任ではない社会の構造的な問題ですが、その点をどのように若い人に伝えていくのかというのは大変難しい問題だと感じています。

**松野** 私の専門は、工場の生産プロセスを扱う化学工学で、学生時代の教授の一言で忘れられない言葉があります。「この世の中で世界最大の反応器を知っているか？ それは一貫製鉄所の高炉だ」と。それ以来、一度実物を見てみたいと思いながらも35歳までその機会がありませんでした。初めて高炉、転炉を見たときのあの感動体験は、本当に心に焼きついて、今でもはっきり覚えているぐらい忘れられない出来事でした。先ほど、学生があまり感動を体験していないという話がありましたが、昨年から「感動体験—鉄の世界から未来を眺める」と題した授業を、大学1、2年生で、まだ進路の決まってない学生にやってみところ、結構反響がありました。これは製鉄会社や鉄鋼協会の育成委員会のご協力を得てようやく成り立っています。1人でも多くの学生に製鉄インフラの実物を見せたいという思いから、今後もこの授業を続けていきたいと思っています。

**松八重** 鉄鋼業は間違いなく日本の大きな基幹産業であり、世界的にも非常に大きな経済の流れを担っている分野です。私自身、経済学の出身ですが、鉄鋼業に対してもっと関心を持つような人材が、社会科学を志向するような人材の中から入ってきていいのではないかと感じています。現場の実態を知らない学生が、社会科学の学部を卒業し、官僚になったり、経営者になったりする。そういう場合がほとんどでしょう。工学教育の中で現場を見ることが重要なように、社会科学の学生にも、現場を見るようなチャンスが与えられれば、日本社会の発展にとって非常に重要な役割を持つのではないかと感じています。

す。もう1つ、これは自分自身が最近求められている役割であり、ますが、グループディスカッションをコーディネート・リードする能力が大切だと思います。国際的な合意形成やガバナンス、そのようなディスカッションに我々のような研究者が出席することは少なくありません。場合によっては、ディスカッションをコーディネートしたり、議論の落としどころを探ったりしなければならないこともあります。これを英語でできるように、大学生あるいは大学院生がそのような能力を身につけるチャンスをつくるべきだろうと感じています。

**中島** 自分たちが使っている製品の中にどのような材料が含まれていて、それがサプライチェーンを通じて、実は環境問題に密接な関係がある、ということを高校生などに話をするのですが、あまり理解されていないように思います。ですから、サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響について、きちんと伝えていくような場として、大学に産業エコロジーの講座をたくさんつくっていただきたいと思っています。また、私自身はそれほど多くの学会に出ているわけではないのですが、鉄鋼協会という学会は非常にユニークな存在だと思っています。特に鉄鋼業の方々の意見が聞ける中で、研究を進められるという点がおもしろいですね。今後は、若手がいろいろな考えの人たちとつながれるような場を、鉄鋼協会の中で持っていただきたいという希望があります。

**山本** 学生にとって、「自分の頭で考えて、行動する」ことはとても重要だと思うのですが、自分の頭で考えるというのはどういうことか、を学生に説明するのはとても難しいことです。そこで、私はこう言っています。「会社に入って仕事をしたときに、言い訳を1つだけ準備しなさい。うまくいったときは1つだけ、なぜうまくいったのかは、説明できるようにしておきなさい。2つは言っちゃだめ」と。言い訳を1つだけ言うためには、結構たくさん考える必要があるのも、自分で考える訓練になるのです。

教育では、見せ方の工夫も必要だと思っています。例えば、鋼種の説明の授業では、鉄板とハイトンの実物を学生に手で折り曲げさせるのです。軟鉄のほうは簡単に曲がりますが、ハイトンは曲がりません。体感するということは重要で、特に環境・エネルギー・社会工学部会として、強化していきたいところです。

最後に、視野を広げるということについてですが、視野は、結局、自分でしか広げられないのですが、それには多彩なキャリアパスが有効です。そのためには、大学と企業の人的交流が今以上に必要だと感じています。材料という観点であれば、鉄のほかにもガラスもあれば、非鉄もあります。少しずつお金を出し合えば、新しい講座を日本国中につくるのはそれほど難しくないような気がします。

本日の議論で、鉄鋼業界の環境に対する関わりと、産学双方の今後の課題が明確になったと思います。本日は、長い時間ご議論いただき、ありがとうございました。