

## 特集記事 7

# ゼロウェイストで環境保全をめざす鉄鋼業

古川 武  
Takeshi Furukawa

NKK 総合材料技術研究所  
主幹研究員

Direction of the Environmental Conservation  
in the Iron and Steel Industry by Zero Waste Production System

## 1 はじめに

地球環境の保全が最も優先的な価値観といわれる‘環境の世紀’21世紀に向けて我が国の鉄鋼業は、環境調和型社会の構築と地球規模の環境保全への貢献を企業の行動指針として明示し<sup>1)</sup>、自然および社会との共生・資源循環型の企業活動をめざして、ゼロエミッションの理念に基づいて地球温暖化防止と廃棄物・リサイクル対策に焦点を当てたさらなるプロセスの変革を進めている<sup>2)</sup>。

21世紀における人口・環境・資源問題から、鉄鋼製造プロセスは、環境保全の観点から①製鉄廃棄物の発生および廃棄の抑制、②環境負荷低減、また、資源保護の観点から①ライフサイクルを考慮した金属資源のリサイクル、②エネルギー資源の高度利用、③省資源・省エネルギー、の視点に立つ対応技術の開発が急務となっている。持続可能な発展をめざした一層の資源リサイクル・エネルギー利用の効率化を基調とする経済社会システムすなわち循環型経済社会の構築へ向けての鉄鋼製造における技術的な課題の一つは、資源リサイクルの方法とその評価の方法である。環境調和型生産技術としての技術の選択に対して、その対応技術の評価・選択基準を明確にし、それに基づいた技術の評価を行い、現状技術の取捨選択と開発すべき技術の方向と選択を行う必要がある。一方では、金属・エネルギー資源の有限性による資源利用の構造変化をも余儀なくされてくる。環境保全技術および資源保全技術と生産技術の一体化なしには21世紀への展望はない。

鉄鋼製造プロセスへ要求されている主要な技術の一つは、廃棄物問題と環境・資源・エネルギー問題に対応した一層高度な副生物の発生抑制技術と資源リサイクル技術である。ここでは鉄鋼業における資源リサイクルの現状と課題について述べ、今後のゼロウェイスト生産システムの構築へ向けての技術開発の課題と展望について考えてみたい。

## 2 資源・環境問題からみた鉄鋼製造プロセス

### 2.1 日本のマテリアルバランスおよびエネルギーバランスと鉄鋼業

我が国における粗鋼の年間生産量はここ10年間で9,800万t/年～11,000万t/年の間を推移している。これに伴う鉄鋼業の経済活動規模は、平成7年の名目国内総生産(GDP)482兆9300億円の1.3%であり、製造業名目国内総生産119兆2800億円の5.3%を占めている<sup>3)</sup>。生産者産出額からみると鉄鋼業は産業全体産出額882兆5400億円の2.3%、製造業産出額309兆4200億円の6.4%となっている<sup>4)</sup>。

この鉄鋼業の経済活動の規模をマテリアルバランスすなわち資源利用および物流の面から見てみると、図1に平成7年の日本のマテリアルバランスを示した<sup>5)</sup>。これによると、日本の物質利用総量は22.1億tで、このうち自然界からの資源採取量は19.3億t、海外からの輸入分は6.8億tとなっている。リサイクル量は2.1億tで物質利用総量の9.5%となっている。また、自然界からの採取資源のうち輸入資源

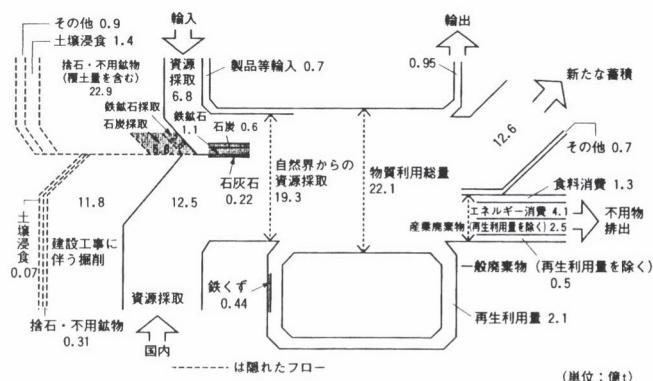


図1 日本のマテリアルバランスと鉄鋼生産の資源利用  
(平成7年度)

の生産の際に発生した捨石・不用鉱物等、いわゆる「隠れたフロー(エコロジカル・リュックサック<sup>6)</sup>」も同図に示されている。

鉄鋼業における主要鉱物資源利用量は、1億1050万tの鉄鉱石と6070万tの石炭をそれぞれ輸入使用し、鉄屑4380万t、石灰石1330万t、生石灰480万t(石灰石換算850万t)を使用している<sup>7)</sup>。鉄鉱石と石炭の輸入依存度は100%であり、鉄屑と石灰石はほぼ国内調達である。この鉄鉱石と石炭の輸入使用量は図1の我が国のマテリアル・バランスからみると輸入資源の25.2%となり、石灰石を含めた量は自然からの資源採取量の10.0%で、鉄屑を含めた量は国内物質利用総量の10.7%を占める。輸入原料に対する

「隠れたフロー」すなわち原料の生産の際に発生した捨石・不用鉱物量は地質的条件や技術によって異なるが、日本の輸入資源の鉄鉱石1tに対して約2.4t、石炭1tに対

して約9.6tと見積られている<sup>8)</sup>。この鉄鉱石および石炭の「隠れたフロー」を図1中に併せて示した。

次に、エネルギーバランスの面から見てみる。図2に平成7年度の日本のエネルギーバランスを示した<sup>9,10)</sup>。これによると平成7年度の一次エネルギー総供給量は $543.9 \times 10^{13}$ kcal( $2.277 \times 10^{16}$ kJ)で、石炭・石油・天然ガスは98.5%が輸入である。鉄鋼の一次エネルギー使用量は石炭・石油 $49.5 \times 10^{13}$ kcal( $2.072 \times 10^{15}$ kJ)で一次エネルギー総供給量の9.1%となっている。エネルギー消費で見ると、鉄鋼は民生用・運輸用も含めた最終エネルギー消費計の11.4%、産業部門最終エネルギー消費の24.0%、製造業最終エネルギー消費の27.0%を占めている。

これらの資源利用による生産および消費に伴う廃棄物の処理・処分・リサイクルの1993年のフローを図3に示した<sup>11)</sup>。産業廃棄物の発生量は3億9700万tで、資源投入量の19%になっている。製造業からの発生量は1億9000万tとなっており、このうちリサイクル量は7100万tで、処理減量後の最終処分量は2500万tで、発生量の6.3%となっている。この産業廃棄物の発生量に占める鉄鋼業からの発生は汚泥、スラグ、ダストが乾量で各々約60万t、3500万t、480万tの計4040万tで、産業廃棄物量の10%で、製造業からの廃棄物量の21%となっている。

## 2.2 鉄鋼製造プロセスのマテリアルバランスとエネルギーバランス

平成7年度の鉄鋼生産のマテリアルバランスを副原料・エネルギー資源を含めて図4にまとめた。粗鋼生産量1億2万tに対して総物質使用量は2億6560万tで、うち輸入資源は約70%となっている。資源投入で見ると、鉄屑のリ

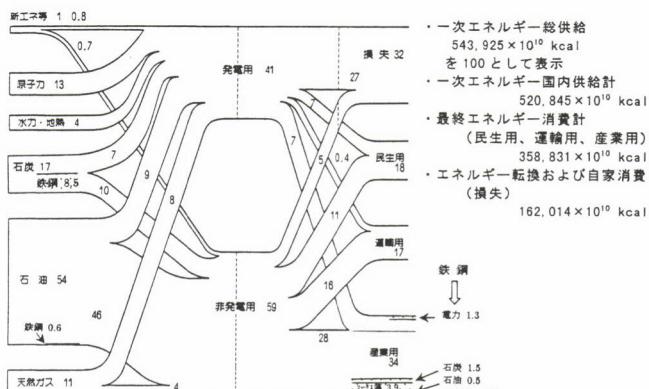


図2 日本のエネルギーバランスと鉄鋼生産のエネルギー利用(平成7年度)

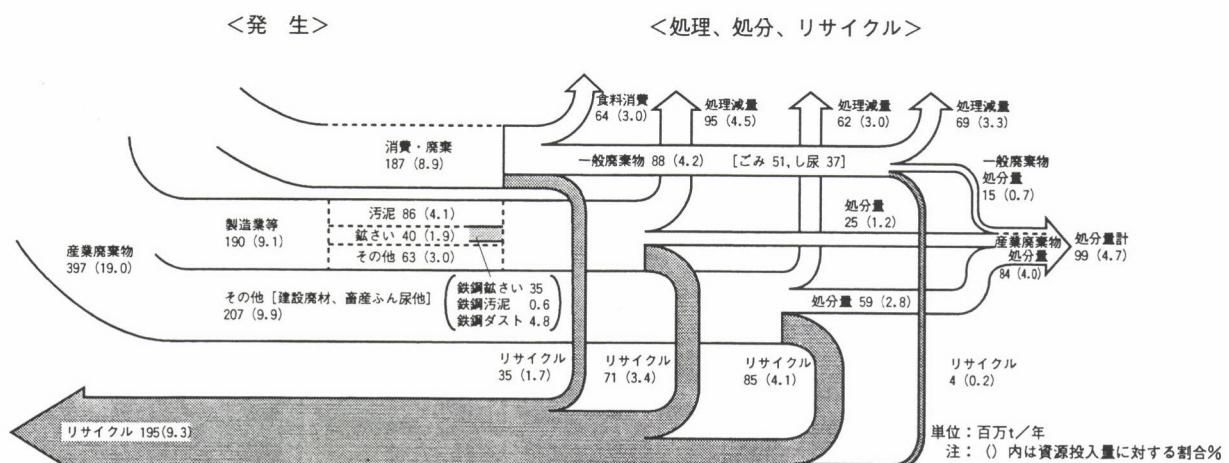


図3 廃棄物の処理・処分・リサイクルのフロー(1993年)<sup>11)</sup>

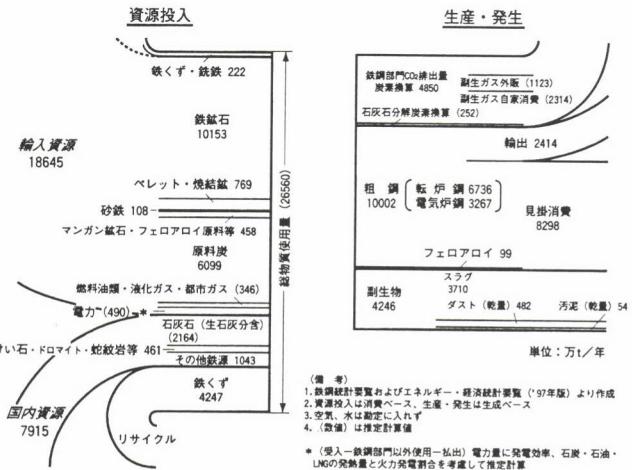


図4 鉄鋼生産のマテリアルバランス(平成7年度)

サイクル量を考慮すると鉄分は約58%が輸入となり、エネルギーとしての炭素・水素分は100%が輸入である。

以上のようなマテリアルバランスおよびエネルギーバランスにもとづく生産活動から派生する主要な環境・資源問題の一つに図3に示した生産に伴う副生物の処理があげられる。鉄鋼製造プロセスから発生する副生物は、大半が有効利用排出物としてリサイクルを主体として利用されているが、廃棄物としての処理をおこなわれているものもあり、これらは資源循環・環境保全・エネルギー利用の観点からも、そのリサイクルの質の向上および廃棄物発生ゼロすなわちゼロウェイスト生産プロセスをめざすことが重要である。

### 3 鉄スクラップのリサイクル

鉄スクラップはリサイクル社会の優等生ともいわれる。図5に我が国の鉄スクラップの流通フローをまとめた<sup>12)</sup>。鉄鋼推定蓄積量は1996年度で約11.5億t、その内の約2.5%の2854万tが老廃屑として回収利用されている。また、加工屑、自家発生屑も合わせて約2000万tが回収利用されている。鉄スクラップの再生利用は、溶解エネルギーだけで還元エネルギーが不要なため環境保全の面からも好ましく、鉄鋼蓄積量の増加と相まってさらに推進していく重要な課題である。しかしながら、今後、老廃屑を主体に約70~90万t/年で増加すると推定されており、その場合、ニッケル、クロム、銅、錫などのトランプエレメントがスクラップに蓄積され、リサイクルに制約を受けることになる。これらの課題に対応するため、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・金属系材料研究開発センター(JRCM)のもとで鉄鋼12社が参加して「環境調和型金属系

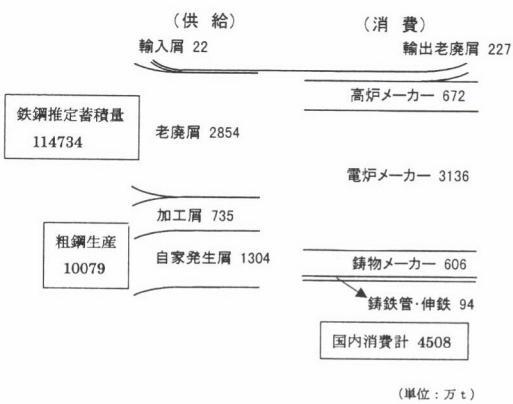


図5 日本における鉄スクラップの流通フロー(1996年度)

素材回生利用基盤技術の開発」の共同研究が行われており、現在、新日本製鐵(株)君津製鉄所内に試験評価設備が設置され、試験が行われている。この研究開発はトランプエレメントの除去技術に加えて、排ガス無害化・ダスト処理技術、省エネルギーのための予熱・溶解技術の開発も含めて、広範囲に鉄スクラップのリサイクルシステムを開発することを目的としている。鉄スクラップのリサイクルシステムについては、このような技術開発に加えてライフサイクルを考慮した材料設計および社会システムの基盤作りも含めて進められている。

### 4 他産業・地域との関わりの中で ・廃プラスチックの高炉への吹込み

環境保全のために他産業および地域との連携がますます重要となる中、他のプロセスあるいは地域から発生する副生物ないしは廃棄物を別のプロセスで原料として用いる、いわゆるプロセス間リンクシステムの例として、ここでは廃プラスチックの高炉への吹込みを紹介する。

1996年におけるプラスチックの生産量は1466万tで、廃プラスチックの発生量は909万tで、リサイクル率は39%となっている。残りの61%(561万t)は単純焼却24%と埋立37%である。

廃プラスチックの高炉への吹き込みは、この単純焼却と埋め立ての廃プラスチックの有効利用の一つとして、高炉での鉄鉱石の還元剤としてコークスの替わりに廃プラスチックを一部代替利用するものである。NKK京浜製鉄所で行われている廃プラスチック高炉原料化リサイクルシステム<sup>13)</sup>は、一貫リサイクルシステムとしては世界初である。1996年10月より稼働しており、図6にシステムフローを示した。この廃プラスチック高炉一貫リサイクルにより、①プラスチック廃棄物の発生の減少、②プラスチック廃棄物の最終処分場が不要、③コークス使用量の削減により、

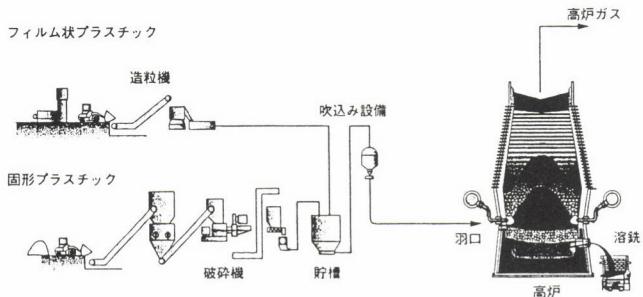


図6 廃プラスチック高炉原料化一貫リサイクルシステム

海外に依存している石炭の省資源となると同時に資源採取に伴う環境負荷の低減にも寄与、④CO<sub>2</sub>の発生量が削減され、地球温暖化にも有効、⑤有害な副生ガスは発生せず、副生ガスは既存のプラントで発電などに利用、⑥このプロセスの総合エネルギー利用効率は80%以上と高レベルで、他のリサイクルプロセスに比べて省資源・省エネルギーの面で有利、等の特長がある。当面、塩化ビニル樹脂を除いた産業廃棄物系廃プラスチックのリサイクルとなっているが、今後、2000年の容器包装リサイクル法の全面施行への対応できる技術として産業廃棄物に加えて一般廃棄物も対象とし、異物除去技術、塩ビの分離、塩ビの脱塩素技術、等の開発も進められている。

## 5 鉄鋼製造プロセスからの副生物のリサイクル

### 5.1 副生物の発生とリサイクルの現状

鉄鋼製造プロセスから発生する副生物の種類は大別して①ダスト、②スラッジ、③スラグ、④廃煉瓦、⑤廃油の5種類となる。

高炉・転炉・電炉スラグ、乾・湿ダストおよび汚泥のリサイクルの状況について図7<sup>14)</sup>に示した。スラグのリサイクルについては各スラグとも道路・鉄道用に利用されているが、各スラグの性状の特性から高炉スラグではセメント用、転炉スラグでは港湾・土木用、電炉スラグでは地盤改良用など、主に各種の土工材として多く利用されている。ダストは焼結・高炉・製鋼原料等の原料としてリサイクルされている。乾ダストで亜鉛回収処理をされている分もあるが、これは主に電炉乾ダストである。汚泥は焼結・高炉・セメント原料としてリサイクルされているが、埋立割合が多い。

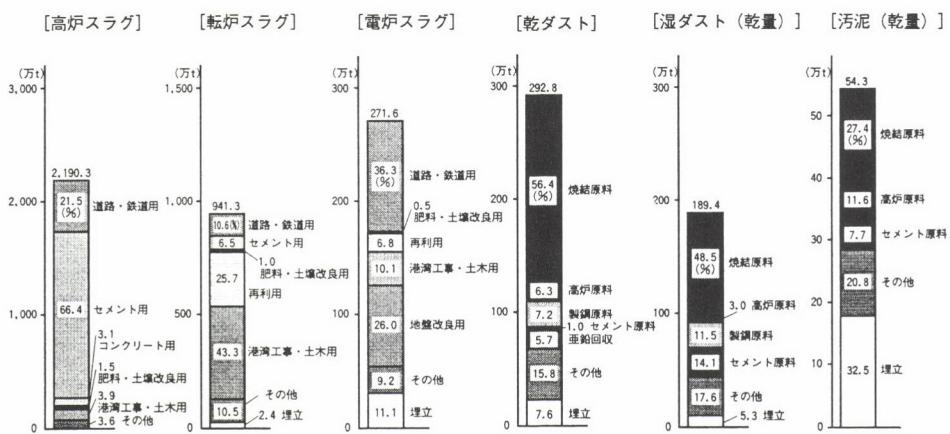
なお、平成7年度における製造業等に係わる産業廃棄物・有効利用物全国調査結果<sup>15)</sup>によると、鉄鋼業は産業廃棄物・有効利用物排出量が製造業中最も多いが、再資源化率は76.9%で製造業中最も高く、製造業平均の38.6%を大きく上回っており、リサイクルトップランナーといえる。

### 5.2 リサイクル処理の問題点および技術課題

#### 5.2.1 ダストのリサイクル処理の問題点と技術課題

ダストのリサイクルの状況を見ると十分なりサイクルとはなっていない。この原因は主に成分、特にZn含有量からきており、Znの排出方法がリサイクルのネックとなっている。ここでは例として鉄スクラップの循環と関連するダスト中亜鉛の資源化について考えてみる。

日本における1991~1996年の亜鉛需給は、概ね、需要が約65~80万t/年で、地金の国内生産量は70万t/年前後で、原料の鉱石は大部分が輸入である。用途は亜鉛めっき鋼板用に約50%が用いられている。亜鉛用途で最も多い亜鉛めっき鋼板は使用後は鉄スクラップとして回収され、多くが電炉で溶解されて鉄鋼製品として再生される。この時、亜鉛は電炉から排出されるダストに入ってくる。このダス

図7 鉄鋼のスラグ、ダスト、汚泥のリサイクル状況(平成7年度)<sup>14)</sup>

トは資源としてみると有価な鉄、亜鉛、鉛を多く含み、鉄鉱石と亜鉛鉱石の混合物ないしは化合物の形態を持つ天然鉱石とは異なる金属資源、いわば都市鉱山資源とみることができる。日本における電炉ダストの発生量は年間約50万tと見積もられ、この内、現状では65%が亜鉛回収処理され、35%は無害化処理して埋立処理となっている。発生ダスト中に含まれる亜鉛量は金属亜鉛換算濃度20%として約10万tとなる。高炉一転炉ダスト中Znと電炉ダスト中Znの総量を概算すると約11.2万tと見積もられ、この量は内需の18%に相当する。現在回収されているZn量は電炉ダストからの5万tと転炉ダストからの0.5万tの推定5.5万tで、内需の8.8%である。ところで、亜鉛資源の耐用年数は19年と見積もられており、主要金属資源の中で最も短く、またリサイクル率も最も低く6%程度である<sup>16)</sup>。リサイクル率の低い理由の一つは犠牲防食というZn本来の役割から自然腐食で土に還るためでもある。一方、Znの生産原料の84%は鉱石で硫化鉱である。このためZn製錬は硫酸が併産となり、硫酸需給の問題から亜鉛製錬メーカーでの酸化鉱の要望も高い。ダスト処理によりZnが原料としての適当な濃度にまで濃縮されれば、Sを含まないことの有利性もでる。

### 5.2.2 スラッジのリサイクル処理の問題点と技術課題

各工程からの排液を一括混合して中和剤、界面活性剤、キレート剤を用いて凝集沈殿させた後に脱水・乾燥等を行う処理フローが主体となっているために、各種成分が混在し、また油分を含まれている場合がほとんどである。硝酸分、Fも含まれるスラッジもあり、さらに、ハンドリング性も悪く、したがってほとんど再利用困難となっている。しかしながら、めっき系スラッジはZnを15%程度含有しており、発生量は乾量で約4万t/年程度と見積もられるので、Zn量は約0.6万tになり、このZnの回収が望まれる。当面は発生系統別に排液を分別回収処理するなどの製造プロセスの改善により、発生量そのものを削減することが重要と考えられる。

### 5.2.3 スラグのリサイクル処理の問題点と技術課題

高炉スラグでは、CaSxが水に溶解して黄色を呈す黄水の問題、転炉スラグでは膨張崩壊性、アルカリの溶出等の問題から、出荷前のエージング処理が必要であり、発生量が多量なために広い保管スペースが必要となっている。また、スラグは高炉では鉄を抽出した残渣であり、転炉では不純物除去材であるので、金属以外の工業原料あるいは建設・土工材として砂・砂利の代替品となっているが、重量の割には有利な商品にはなっていない。発生量の削減が重

要な課題であるが、高炉スラグは原料の脈石由来であり、その量の削減には限界がある。一方、転炉・電気炉では不純物除去材であるため、操業・処理方法の工夫により削減が可能とされ、転炉スラグの発生を極少化する努力がはらわれている。発生量に対してはその量の割合はわずかではあるが、スラグウール化、予備処理スラグはその成分特性に合わせたりサイクルの方向、例えばカリ肥料、リン酸肥料へのスラグの高付加価値化へ向けた処理技術の開発が進められている。

## 6 新しいリサイクル処理プロセスの開発

### 6.1 ダスト処理プロセス

ダスト処理のニーズに対して、主に電気炉ダストを対象に亜鉛の回収を指向したプロセスが稼働および開発が行われている。しかしながら、現状では日本、米国、欧州とも発生ダストの多くはウェルツキルン法によって処理されおり、処理会社も限定されている。このため最近では、環境規制への対応と発生量の増大に伴う処理コストの面から、ウェルツキルン法に代わる簡易で安価で効率のよいオンラインサイトで処理できるプロセスの開発が盛んになっている。新しい処理プロセスの提案の一例として、(財)金属系材料研究開発センター(JRCM)からダストの発生工程の中で有価な金属のリサイクルや環境の改善をめざす技術開発が提案された。そのプロセスイメージを現状の代表的処理フローと比較して図8に示した<sup>17)</sup>。この提案を電炉ダストを対象に考える。その組成はFe約33%、Zn約18%である。このため、電炉の密閉化をはかるとともに排ガスの温度と酸素ボテンシャルを制御してFeとZnを分別回収できれば、回収物は直ちに各々の原料としてリサイクルでき、ダスト発生ゼロを実現できる。「省エネルギー型金属ダスト回生技術の開発」と題して工業技術院の「即効的・革新的エネルギー

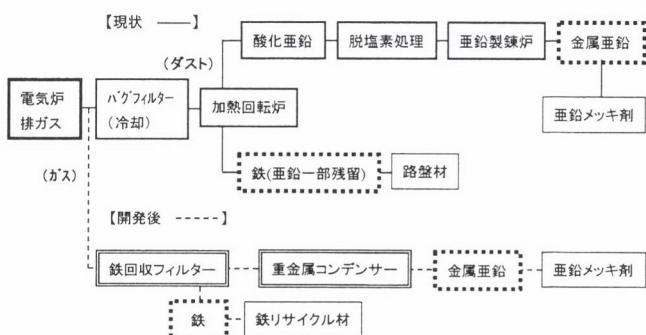


図8 省エネルギー型金属ダスト回生技術の提案プロセスフロー

環境技術研究開発」に採択され、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のもとJRCM、4大学、1公研および企業8社が参加して平成10年度から5年間の予定で研究開発が開始された。成果が期待される。

## 6.2 スラッジ処理プロセス

スラッジの処理プロセスで専用の処理プロセスは稼働していないと見られる。このような状況に対して「産業汚泥に含まれる有価金属資源化技術の開発」と題して研究開発の提案が行われ、平成9年度から5年間の予定で(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)の「地球環境保全関係産業技術開発促進事業」でJRCMおよび企業3社が参加して研究開発が開始された。図9に提案のプロセスのイメージ図を示した<sup>18)</sup>。提案のプロセスは第一段階として廃液中のFe、Zn等を選択凝集分離とともに、F、Cl成分の分離も行う湿式のハイブリッド粗分離と、粗分離で分離された金属成分の沈殿凝集物を、それに続く第二段階の溶融処理炉により低蒸気圧金属成分と高蒸気圧金属成分とに分離することにより、金属成分の分離回収・リサイクルをめざしている。この開発にも成果が期待される。

## 6.3 その他の副生物の処理プロセスの提案

スラグについてはその発生量を最少にするプロセス、鉄鋼ダスト・アルミドロス・廃油混合物の電気炉へのリサイクル、ステンレス酸洗剤の処理技術など、具体的な開発提案が行われ、一部実行に移されている<sup>19)</sup>。また、リサイクルを効率よく進めるために‘異業種プロセス間のリンクシステムの開発’、リサイクル評価のための‘ゼロウェイスト評価システムの開発’なども提案されている。さらに、JRCMではTotal Energy and Material Control System(TEM-

COS)の構築をめざした活動が続けられている<sup>20)</sup>。この活動は素材産業がトータル・エネルギー・マテリアル・コントロール産業として、今後の循環型経済社会の構築に寄与することをめざしたものである。積極的な取り組みが期待される。



## ゼロウェイスト生産システムへ 向けての今後の課題と展望

### 7.1 リサイクル処理の技術課題

循環経済の原則は①発生回避、②再商品化・再資源化等の再利用、③環境に調和した方法での処分、とされる。この原則に基づくと環境・資源対応として二次資源のリサイクル基礎技術の構築のためには、①プロセス改良あるいは抜本的なプロセス変更による副生物の発生量の低減、②プロセス内リサイクルと副生物の他プロセスでの資源利用、が基本的な対応の方向と考えられる。そして、①発生量、②種類、③成分、④形態、⑤処理設備規模または処理可能ルートの存在等に基づいて、開発すべき適正処理プロセスを検討する必要がある。その場合、製鉄所へのインプット－アウトプットバランスから何れの成分も最終的には製鉄所から排出されることとなる。したがって、処理困難な副生物となる成分のインプットを抑制することと、インプット成分については排出時に製品あるいは他プロセスでの付加価値の高い原料となっていることが、当然望まれる。

### 7.2 今後の課題と展望

現状での環境コストとともに言うべき副生物の処理・リサイクルコストは、その多くがすでに内部化されているが、今後さらに新たな環境コストの内部化が求められてくる。そのためにも副生物の再資源化の技術開発が強く求められる。エンド・オブ・ザ・パイプの考え方ではなく、ゆりかごからゆりかごまでの理念に基づいて、個々の企業はもとより社会全体としてリサイクルに取り組まなければならぬ。持続可能な発展を制限するのは資源の欠乏ではなく、廃棄物処理の問題ではないかとする考え方もある。環境・資源問題解決のためには、中長期的視野に立つ技術開発が必要であり、そのことが鉄鋼業の将来に大きな影響を持つとともに、さらなる発展の可能性をも有している、と考える。今後の資源循環・環境調和をめざした副生物および廃棄物の発生抑制と環境に調和した高度回生技術の開発は、社会的、経済的にも要求は年々増している。世界的に今後ますます環境規制が強化される状況のもと、これら対応技術の開発は、日本鉄鋼業における資源循環・環境調和型生産技術の先行による世界への寄与としても期待される。

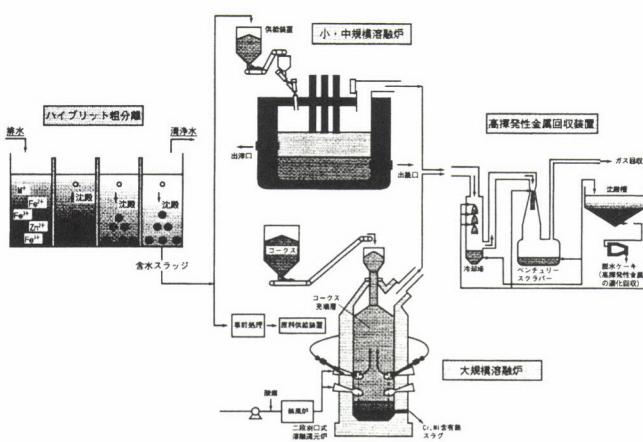


図9 産業汚泥に含まれる有価金属資源化技術の提案プロセスフロー

## 8 おわりに

製鉄プロセスにおけるリサイクルの状況と今後の方向について述べ、ゼロウェイスト生産プロセスに向けた鉄鋼業の取り組みについて紹介した。本講が21世紀の鉄鋼業の新たな展開へ向けて、そして次の世代に夢のある鉄鋼製造プロセスを引き継いで貢うために、今、何が求められているかについて考える一助になれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟：環境に関する行動指針，鉄鋼界報，1585 (1993)
- 2) 日本鉄鋼連盟：鉄鋼業の環境保全に関する自主行動計画，鉄鋼界報，1698 (1997)
- 3) 国民経済計算統計，経済企画庁編，(1997)，133.
- 4) 産業連関表1995年，通商産業大臣官房調査統計部編，(1995)，101.
- 5) 環境白書，平成9年版 総説，環境庁編，(1997)，179.
- 6) 森口祐一，吉田雅哉：第13回エネルギー・システム・経済コンファレンス，講演論文集，エネルギー・資源学会，(1997)，37.
- 7) 鉄鋼統計要覧，日本鉄鋼連盟 鉄鋼統計専門委員会編，(1997)，115，138.
- 8) Resource Flows The Material Basis of Industrial Economics, World Resources Institute, (1997), 44.
- 9) エネルギー'97，通商産業省編，電力新報社，15.
- 10) 総合エネルギー統計 平成9年度版，資源エネルギー庁長官官房企画調査課編，通商産業研究社，296.
- 11) クリーンジャパン，クリーン・ジャパン・センター，122 (1997)，50.
- 12) 鉄源年報，日本鉄源協会，9 (1998)，18.
- 13) 脇元一政：リサイクル技術研究発表会講演論文集(第4回)，クリーンジャパンセンター，(1996)，93.
- 14) 鉄鋼業のスラグ等の発生及び利用・埋立て状況報告書，日本鉄鋼連盟，(1995)
- 15) 永田令子：クリーンジャパン，123 (1997)，16.
- 16) 金属の資源・製鍊・リサイクル，(財)未踏科学技術協会監修，長井 寿編，化学工業日報社，11，17.
- 17) JRRCM NEWS, (財)金属系材料研究開発センター，148 (1999)
- 18) JRRCM NEWS, (財)金属系材料研究開発センター，134 (1997)
- 19) (財)金属系材料研究開発センター，金属系二次資源有効活用部会パートII，調査報告書，(1997)
- 20) 上杉浩之：BOUNDARY, 3 (1999)

(1999年3月8日受付)