

にダストに関しては、ロータリーハース炉などの開発により、安定した処理が行われるようになった。残りは、ごく特殊なスラグ、ダスト、廃れんがなどと一部廃水処理で生じる汚泥である。これらにしても再資源化が技術的に不可能なわけではなく、多くの場合は経済的理由から対応が遅れている。特に汚泥については、排水系の整理（これにより汚泥中の成分が制御可能となる）と製鉄所に未利用で残っている低温排熱を利用した経済的な乾燥技術が開発されれば、かなりの部分が解決すると予想される。

電気炉業は鉄のリサイクルというある意味では鉄鋼業界における循環型社会構築の最大の貢献を行っているにもかかわらず、大きな課題が残されている。本質的に不安定な鉄のスクラップ価格に対応しながら安定した製品の質と量を求められている。近年ではダイオキシン対策特別措置法の適用も受けようになり、排ガスについてもより厳しい環境規制を受けている。安定した発展を推進するには、この分野こそ新たな技術開発が望まれる。特に古くから課題とされているトランプエレメントの除去や電気炉ダストからの効率よい亜鉛回収など課題が多い。一部の大手電気炉メーカーではこれらの課題に積極的に取り組んでいるが、まだ技術的に解決した状況にはなっていない。

一方他産業の副生物の資源化も前述のCO₂問題と同様な境界の拡大が行われようとしている。しかしながら、この場合はより慎重な態度が必要と思われる。我が国には世界でも厳しい環境規制が要求されている廃棄物処理法が存在し、対象物が逆有償だと廃棄物処理法が適用される。技術的には一部他産業の副生物（場合によっては廃棄物）を資源化するポテンシャルを持つが、製鉄所の設備が廃棄物処理の認定をとる必要がある可能性が生じるために簡単に展開できない。もちろん一部の製鉄所はすでに廃棄物処理業の許可を得ているが、鉄鋼業界全体の動きにするには、社会システム上の課題がある。特に電気炉業の場合は、ある種の廃棄物の逆有償での受け入れが経済的にメリットを見出すことも十分にあるので、これから他産業の副生物（廃棄物）を合理的に資源化することがさらに進むと予想される。その場合、そのための技術開発のみならず、社会システムでの課題の解決を行うことが必要である。

(3) これからの方向

環境技術に関するパラダイム転換が行われた今、鉄鋼業として単に従来の枠組みの中での省エネルギーや副生物の資源化では十分でなくなっている。そのことはこれからの環境技術を考える上で単にある条件での最適化技術の開発ではなく、大きく社会システムの中での最適化技術を開発しなくてはならないことを意味する。そのために技術の開発と社会

システムの整備は車の両輪である。さらに一步進めて、製鉄所や電炉メーカーのポテンシャルを生かすべく、積極的に社会システムの提案まで検討する必要があると思われる。

以上のことを念頭に置きながらも製鉄業の本務は、優良な鉄鋼製品をもっとも環境負荷を低く、安価に製造することであろう。その意味では従来通りであるが、高強度鋼の開発や高耐食鋼の開発はいわゆるエコマテリアルとしての環境技術に入る。プロセスにおいては、投入されたエネルギーと原材料の徹底した有効利用を行うための技術がさらに望まれる。その上でプロセス間リンクやエココンビナートのより強力な促進を目指して、副生物間を結びつけるための技術開発が重要となる。ただ、鉄鋼業の設備は基本的に大型のものが多く、一度入れると変更が容易ではない。それでも前述のような対応が必要となることを考慮すると、これまで以上に各要素技術をユニット化し、比較的簡単に各ユニットを結びつける技術開発が望まれる。特にプロセス間リンクを中心としたエココンビナートは、技術のユニット化とその最適化によって成長を続けることが可能となる。

8.1.2 環境対策に関する研究・技術の進展

鉄鋼は日本の一次エネルギー使用量の約1割を占める産業である。したがって、その環境影響インパクトは極めて大きく、従来からNO_x、SO_x、煤塵をはじめとする種々の環境汚染物質の排出抑制に関する研究開発が精力的に行われてきた。図8.2に（財）鉄鋼業環境技術開発基金から大学など研究機関への研究助成件数の推移を示す。1980年代は排ガス、排水中の環境汚染物質関係が主体であった環境研究は、1990年前後を境として、地球環境やスラグやダストなど副生物の処理や有効利用に関する研究、また90年代後半からはダイオキシン類など難分解性有害物質の研究を加え広がってきている。このうち、地球環境関連研究はCO₂排出削

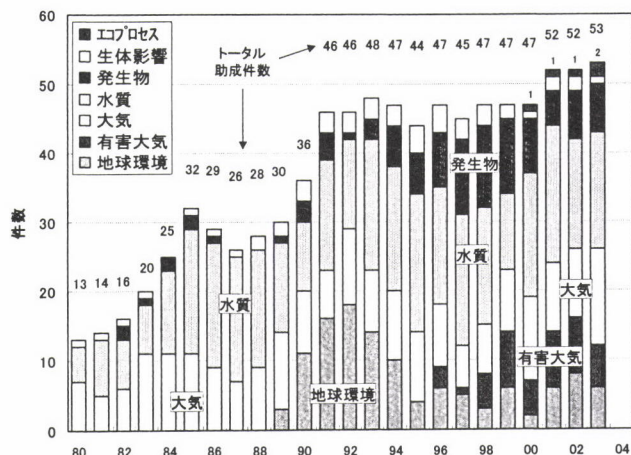


図8.2 鉄鋼業環境保全技術開発基金の環境研究助成件数の推移

減・固定化など温暖化防止のテーマが主体であり、従来も省エネルギーやプロセス効率追求の観点から指向されてきた課題をさらに拡張したものも多い。

本項では、廃棄物ゼロの視点から要求の強い鉄鋼ダスト処理・資源化研究、および「ダイオキシン類対策特別措置法(1999年7月成立、2000年1月施行)」によって急激に進んだダイオキシン類排出抑制研究について概説する。

(1) 鉄鋼ダスト処理・資源化研究

鉄鋼製造プロセスから発生する副生成物は大別すると、ダスト、スラッジ、スラグ、廃煉瓦、廃油の5種類である。一貫製鉄所で発生するダストのリサイクルは主に焼結、高炉、転炉など、製鉄・製鋼プロセスを利用して行われてきた。しかし、高炉と転炉ダストの発生量は併せて年間約450万トンと大きく、亜鉛(Zn)の系内濃縮による高炉操業への悪影響の問題から、直接リサイクル率は限られる。他方、電気炉ダストの年間発生量は50万トン程度であるが、亜鉛含有量が高く約60%がZn回収工程で処理され、残りはセメント原料化および埋立て処分されてきたが、それぞれ塩素含有量制約と重金属の溶出基準確保のためのコストが問題である。両者が含有するZn総量はおよそ11万2千トンであり、これは国内の年間Zn使用量の約18%に相当し、製鉄ダストは貴重なZn資源と位置づけることができる。

①一貫製鉄所で発生するダスト

焼結、高炉、転炉ダストは、Zn含有量の高低で分別し、低Zn濃度のものを焼結鉱原料としてリサイクル使用している。しかし、ダスト粒度は通常10 μm 以下と微粒であり、粒子表面が疎水性を示すことにより造粒性が低く、低Znダストのコールドボンドペレット化技術も適用されてきた。

高Znダストに対してはZn、Pb、Clなどの揮発除去と鉄源還元を同時に行うことを目的とした乾式処理が試みられ、熱炭素還元研究を主体とした研究が進められた。代表プロセスとしては、高炉湿ダストや圧延スラッジ等の処理のためのロータリーキルン式や回転炉床(RHF)式の固体還元法がある。一方、ロータリーキルン内で溶融還元処理するプロセスや、2段および多段羽口シャフト炉で還元溶融処理プロセスの研究開発も行われ、ステンレス製錬ダストからのCr、Niの効率的回収や後述する電気炉ダストの処理プロセスとして実用化されている。さらに、RHF式を用い炉床上面に炭材層をおき、その上でダストを高温還元するとメタルとスラグに分離する現象を利用したプロセスに関する研究開発も進められている。また、ダスト類の自己焼結による脱Znと高炉原料化に関する検討も行われている。

②電気製鋼で発生するダスト

電気炉ダストは20%程度のZnと2~3%程度のPbを含む

ため、多くはWaeltz kiln法、ロータリーキルン法、半溶鉱炉法(MF法)、電熱蒸留法などによってこれらの成分を揮発除去し、得られた2次ダストをISP(Imperial Smelting Processes)などによる亜鉛製錬に用いる原料として供給している。各プロセスは部分的に塩化揮発に基づいており、ダスト中のClを有効使用していることになる。

電気炉ダストの資源化に関しては、NEDO、JRCMが中心となり、「省エネルギー型金属ダスト回生技術の開発(1998~2002年度)」をテーマに産学共同研究が行われた。電気炉排ガス中のFeおよびZn成分を金属状態のまま、それぞれ炭材フィルターとセラミックス球を使用する亜鉛蒸気コンデンサーで回収することを目的とした技術開発プロジェクトである。本プロジェクトは、完全密閉電気炉によるダストレス製鋼プロセスの実用化を目指し、「省エネルギー型金属ダスト回生技術の実用化開発(2003~2005年度)」として活動を継続している。

③将来的研究課題

ダスト類はいずれも粉状であり、特に電気炉ダストや転炉ダストは粒度10 μm 以下の微粉割合が多い。成分はダストの発生箇所によって様々であり、炭素やハロゲン成分が高い場合もある。特に、金属やハロゲン成分の存在形態については十分な検討が行われているとはいいがたく、効率的な処理プロセス開発の隘路となっている。したがって、ダスト類の循環利用法確立にあたっては、各ダストの成分や形態、発生量を把握し、それらに対応する種々の技術の組合せを念頭に最適システムを構築する必要がある。

(2) ダイオキシン類排出抑制研究

①鉄鋼業からのダイオキシン発生量の推移

鉄鋼業において、ダイオキシン類の排出規制対象施設は「鉄鋼業焼結施設」と「製鋼用電気炉」である。なお、「亜鉛回収施設」も製鋼用電気炉ダストに含まれる亜鉛を回収、精製するためのものであり、関連性は深い。

表8.1に我が国のダイオキシン類発生源および発生量の推移を抜粋して示す。比較的信頼性の高い統計値が存在する1997年を基準にすると、総毒性排出量は現在の最新統計値である2003年までの6年間で約1/20に低減されている。これは主に一般廃棄物および産業廃棄物の焼却施設での大幅な排出量低減によるものである。また、鉄鋼関連の「製鋼用電気炉」と「鉄鋼業焼結施設」においても40%程度までの低減が達成されている。表8.1には2002年の排出量目標値(2000年に政府が設定)も併せて示したが、鉄鋼業関連施設はいずれも目標値を十分クリアーしている。

②鉄鋼関連ダイオキシン類排出抑制に関する研究の概要

1997年、鉄鋼メーカー59社が参画する「電気炉排ガス研

表8.1 我が国のダイオキシン類発生源および発生量の推移 (g-TEQ/年)

統計年	1997	1998	1999	2000	2001	2002 (2002)	2003
発生源	特別措置法 成立		特別措置法 施行		暫定基準解除 (目標値)		
一般廃棄物焼却施設	5000	1550	1350	1019	812	370	71
産業廃棄物焼却施設	1500	1100	690	555	533	265	74
小型廃棄物焼却炉	700-1153	700-1153	517-848	544-875	342-454	112-135	73-98
製鋼用電気炉	228.5	139.9	141.5	131.1	95.3	94.8	80.3
鉄鋼業焼結工程	135.0	113.8	101.3	69.8	65.0	51.1	35.7
亜鉛回収業	47.4	25.4	21.8	26.5	9.2	14.7	5.5
7%ニウム合金製造業	21.8	20.8	13.3	14.2	14.7	14.4	17.4
セメント製造施設	4.7	4.1	3.9	4.0	3.2	3.7	4.7
伸銅品製造施設	3.2	3.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
火力発電所	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.9	2.0
火葬場	2.1-4.6	2.2-4.8	2.2-4.9	2.2-4.8	2.2-4.9	2.3-5.1	2.3-5.1
自動車排出ガス	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
合計	7910	3920	3040	2460	1960	957	843-891
							390

究委員会」がNEDOの補助を受けて日本鉄鋼連盟に設置され、1999年までの3年間、電気炉からの排出削減を直接対象とした研究活動が行われた。一方、鉄鉱石焼結に関しては、1997年に鉄鋼業環境保全技術開発基金の大規模研究プロジェクトとして高炉7社と3大学の産学共同研究会「SDD研究会」が設立され、2001年までの4年余りの研究活動が行われた。その後、日本鉄鋼協会の戦略的研究課題テーマとして、「高温燃焼プロセスでのダイオキシン類生成抑制法の開発」が採択され、*de novo* 合成反応の詳細解明、焼結機ウインドボックスダストの解析、コークス性状影響などに関する基礎的検討が行われた。

・製鋼用電気炉

電気炉排ガス研究委員会では、まず電気炉製鋼プロセス全体でのダイオキシン類の挙動把握が試みられると共に、スクラップ予熱炉 (SPH) や集塵機内でのダイオキシン類の挙動が詳細に検討された。また、排ガス中ダイオキシン類の効率的分解を目的とした2次燃焼塔、再合成防止を目的とした急冷スプレー塔、吸着除去を目的としたバグハウスの各効果等についてテストプラントを用いた検討が行われた。主な結果は以下のようにまとめられている。

- i) スクラップ中塩素濃度の低下はダイオキシン類生成抑制に顕著な効果がある。
- ii) 電気炉排ガス2次燃焼温度の上昇は電気炉内で生成したダイオキシン類の分解率向上に顕著な効果がある (2次燃焼温度900℃での分解率：99.9%)。
- iii) 排ガス急冷スプレー塔の出口ガス温度を250℃以下に低下することにより、排ガス冷却過程でのダイオキシン類濃度上昇 (再合成反応) を抑制できる。
- vi) バグハウス入口温度の低下は、排ガス中ダイオキシン類の補足率増加に顕著な効果がある。

以上、製鋼用電気炉においてはバッチ式操業の宿命から、排ガス温度や組成の一貫制御が難しいため、原料中の塩素成分含有量低下への努力に加え、2次燃焼塔による排ガス中未燃成分の完全燃焼、高温排ガスの急冷、排ガス集塵温度制御

など、排ガス処理プロセスの高度化が必要とされる。

・鉄鉱石焼結機

焼結プロセスには高炉に装入できない細粒焼結鉱 (返鉱)、焼結機自身の集塵ダスト、高炉ダスト、圧延スケールなどの製鉄副生物ダストも使用されており、製鉄所内のリサイクルプロセスとしての役割をも担っている。焼結機 (Dwight-Lloyd 型) は定常プロセスであるが、各ウインドボックスのガス組成、温度には大きな相違があり、通常、これらの合流処理が行われている。1次集塵装置としては通常、乾式電気集塵機が採用されている。

SDD 研究会では、まず排ガス処理設備が相違する2つの実焼結機 (乾式電気集塵機のみ、およびこれに脱硫設備+湿式電気集塵機+脱硝設備) での測定を行い、焼結工程におけるダイオキシン類のマクロ的挙動を明らかにした。塩素源については、一般的な原・燃料の塩素濃度は低いが、輸送・保管過程での塩類付着の可能性が否定できず、また、リサイクル原料には塩素の比較的高いものが存在する。塩素の一部は焼成中に HCl、Cl₂、やアルカリ塩等の形で揮発し、集塵機ダストに含有する形で工程内を循環する。配合原料中の塩素濃度とダイオキシン類生成量については、正の相関関係があり、留意すべき事項である。また、実機測定と並行して系統的な焼結鍋試験を行い、原・燃料や焼成条件の影響を検討した。さらに、焼成中断試料の解析により、焼結層内のダイオキシン類と関連物質の挙動を調査した。主な結果は以下のよう

- i) ダイオキシン類濃度は排ガス温度がピークを示す直前で最高値を示す。
- ii) ダイオキシン類量は配合原料中に存在する量と電気集塵機入口を通過する量がほぼ等しいが、実態としては、配合原料中のダイオキシン類はほとんど分解し、ほぼ等量が新たに発生するものと推定される。
- iii) 配合原料中の塩素濃度と排ガス中ダイオキシン類濃度はほぼ比例し、塩素源形態の影響は小さい。
- iv) 炭材・コークス種、および配合原料中の銅濃度の影響は大きい。

また、床敷においても焼結層に匹敵する量のダイオキシン類が発生すること、および焼結層上層への塩素化合物の偏析によりダイオキシン類発生量が増加することなどから、焼結層内で発生した未燃炭素粒子「すす」がダイオキシン類生成の直接的な原因物質であることが推定されている。さらに、焼結層内で移動・濃縮する成分 (未燃炭素 (炭化水素)、塩素化合物、銅化合物など) やダイオキシン類生成抑制作用を持つと考えられる含窒素化合物 (尿素やアミン類など) の挙動の定量的把握とこれら成分の複合体からのダイオキシン類発生挙動に関して基礎的な検討が行われた。

焼結機においても、排出ガスに含有される煤塵の特に表面近傍にダイオキシン類が存在すると考えられる。従って、排出ガス除塵の強化がダイオキシン類の環境排出低減につながるため、煤塵濃度の低減に努力が払われている。乾式タイプの除塵設備では、脱硫・脱硝にも効果的とされる活性炭コース移動層方式による活性炭吸着法が普及してきた。一方、湿式の電気集塵機も効果的とされる。また、主排ガスを焼結ベッドに循環してダイオキシンを熱分解させるとともに排出ガス総量を抑制する排ガス循環法も採用されている。一方、このような排ガス処理技術ばかりでなく、ダイオキシン類の発生が少ない無煙炭の使用や、銅成分、油分濃度の高い原料（スケール、ダスト）の排除や塩素成分の除去など、原料配合管理も強化されている。

8.1.3 製鉄所発生ダストの処理技術

製鉄所で発生するダストは、その製造プロセス、製造品種によって多様な特性を有するが、その大半は焼結工場に代表される既存製鉄プロセスでの再利用、セメント工場に代表される他業界への外販等により処理されている。しかしその一方で、亜鉛、アルカリ等の製鉄プロセスにリサイクルしにくい成分を含むダストについては、例えば湿式分級処理による高亜鉛含有ダストの減量化やロータリーキルンによる脱亜鉛処理等々も行なわれてきたが、その大部分は製鉄所内外で埋め立て処分にされてきた。

しかしながら、埋め立て処分場の枯渇問題、処分コストの高騰、さらには近年の環境・資源問題に対する関心の高まりや環境規制問題を背景に、鉄鋼業界もゼロエMISSIONの循環型社会の構築に向けて、製鉄所発生ダストを所内で有効に再利用するためのダスト処理技術の開発、実用化に力を入れてきた。

基本的には、直接還元プロセスや溶融還元プロセスといったこれまで“鉄作り”のために開発されてきた高温反応プロセスをダスト処理に応用したものである。ここではその中から、この10年間に実用化に供されたプロセスとして、製鉄ダストの脱亜鉛プロセスの代表例であるFASTMET法と、ステンレス鋼ダストの有効な処理方法であるSTAR法について紹介する。

(1) FASTMET法

亜鉛メッキ鋼板スクラップの使用拡大等により、製鉄所発生ダストの亜鉛含有量が増加しつつある。しかしながら、亜鉛は高炉内での付着物生成の原因となるため高炉装入量が制限され、一般的に高炉湿ダスト等の高亜鉛含有ダストは再利用が困難となっており、脱亜鉛して高炉や転炉で使うことが望まれる。

亜鉛を分離する方法として、高温の還元雰囲気において亜鉛を金属蒸気としてダストから気相へ放出する方法が知られており、従来は上述のWeltzキルンプロセスに代表されるロータリーキルンによる脱亜鉛処理等が行なわれてきた。この方法では還元剤である炭素とダストとの接触面積が小さいため反応速度が小さく、またキルン炉の炉温制約もあり、生産性が低いという課題があった。この課題を解決するために開発されたプロセスがFASTMET法であり、本来鉄鉱石を直接還元するプロセスとして開発されたものである。

図8.3にFASTMET法のプロセスフロー図を示す。鉄、炭素、亜鉛等を含んだダストと炭材を所定の比率で混合、成型したペレットあるいはブリケットをドーナツ上の回転炉床（ロータリーハース炉）に1～2層敷き詰め、1300～1350℃でバーナー加熱し、約10分で酸化鉄、酸化亜鉛等を還元する。金属蒸気となった亜鉛分は排気系の集塵機で酸化亜鉛として回収され、脱亜鉛された還元鉄は高炉や転炉で再利用される。

FASTMET法における炭材内装ペレット（ブリケット）では、微粒の酸化鉄、酸化亜鉛、炭材がひとつのペレット内に隣接して存在している。そのためペレット自体がマイクロリアクターとして働き、その内部でCOガス再生を介した還元反応とガス化反応の相互作用によって反応全体が促進され、非常に高い還元速度が得られ、そのことがFASTMET法を非常に効率の良いプロセスにしている。

FASTMET法は、2000年に新日本製鐵（株）・広畑製鉄所で1号機が、2001年に（株）神戸製鋼所・加古川製鉄所で2号機が稼動開始した。還元鉄の金属化率は約92%、脱亜鉛率は約94%であり、回収されたダスト中の亜鉛分も60%以上に濃縮される。2000年にはFASTMET法と同じロータリーハース炉を用いた脱亜鉛プロセスであるINMETCO法も新日本製鐵（株）・君津製鉄所で稼動開始した。

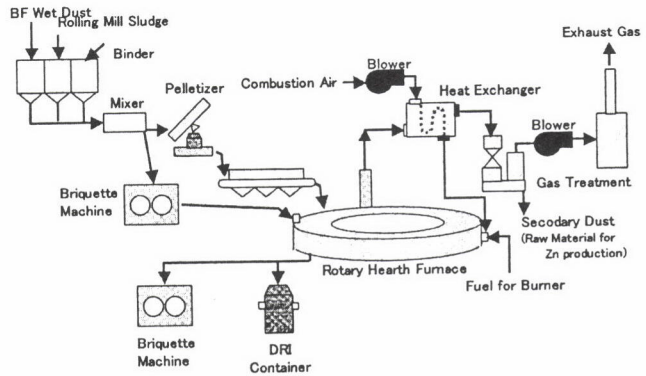


図8.3 FASTMET法のプロセスフロー図
(鉄鋼協会シンポジウム「新鉄源・ダスト処理に関する新プロセス」(2004))