

削減可能性の高い廃棄物の調査にもとづく 製鉄プロセスを用いたリサイクル可能性の検討

加藤 嘉英*・近藤 國弘*・大谷 尚史*・中村 崇*²

Examination on Recycling Possibility by Steel Manufacturing Based on Survey of Reducible Wastes

Yoshiei KATO, Kunihiro KONDO, Takashi OTANI and Takashi NAKAMURA

Synopsis : Survey on wastes required for reduction in paper, house, food, printing, pharmaceutical manufacturing and glass manufacturing industries was carried out by a hearing method, and their recycling systems using manufacturing processes of steel products were examined in order to enhance process linkage between the different industries and to decrease wastes emission. Paper sludge in paper, construction and demolition waste wood and waste plaster board in house, waste ion exchange resin in food, incineration ash in printing, inorganic sludge in pharmaceutical manufacturing and chemical division of glass industries were found by hearing of each company. The paper sludge as a sinter material, the construction and demolition waste wood as a blast furnace reductant, and the incineration ash of municipal solid waste as a molten slag by a electric furnace for steelmaking are hopeful from the viewpoint of the progress of their technology, the large treatment amounts and their efficient delivery. The calculated CO₂ emission of paper sludge utilization as the sinter material and that of scraped wood as the blast furnace is less than power generation by incineration, while that of molten slag of incineration ash utilized by electric furnace is larger than cement materials.

Key words: ironmaking; steelmaking; paper sludge; construction and demolition waste wood; incineration ash; recycle.

1. はじめに

産業廃棄物の最終処分量は、各種リサイクル法の施行ならびに産業界の取り組みによって減少しつつある。しかし、同一企業内または同一産業内での経済性のある廃棄物削減は、早晚限界に来ることが予想されるので、ある企業にとっての廃棄物を、業種の異なる他の企業に対して有用な資源とするシステムを広げることが重要である。

このような認識の下、産業を素材産業と製品産業に大別して両産業間の連携を深め、物質・エネルギー面でプロセスリンクを図ることにより循環型社会を構築しようとする構想が TEMCOS¹⁾ (Total Energy and Materials Control Systems)として打ち出された。その最終目標は、プロセス間リンク技術と地域融合化技術をシステム化して循環型・地域融合型産業を各地域に適合した方式で普及することであり、主に素材産業を対象とした調査が進められた^{2,3)}。これらの概念は、エココンビナート構想に繋がったと言える⁴⁾。

素材産業である鉄鋼業での上記構想の実例として、以前から行われているスラグのセメント原料化や路盤材等への土木資材化があり、最近では廃プラスチックの高炉⁵⁾またはコークス炉⁶⁾原料化、半導体メーカーから排出される廃

フッ硝酸のステンレス鋼板酸洗原料化⁷⁾等の例がある。これらは、代表的な大量生産業種である鉄鋼業の特徴を捉えた業種間プロセスリンクの例として、循環型社会構築に有用なものとなっている。しかし、上記 TEMCOS 構想を踏まえた調査においても、鉄鋼業と比較的なじみの薄い製品・消費材産業から発生する廃棄物を鉄鋼プロセスで処理し、資源化する方法についての調査はなされていない。そこで、製紙、住宅、食品、印刷、製薬、ガラスの6業種に関して、削減ニーズの高い廃棄物の発生状況を個別企業にヒアリングし、抽出された廃棄物を、鉄鋼プロセスを活用してリサイクルする可能性に関して、その量やCO₂排出量を含め検討した。

2. 削減ニーズの高い廃棄物のヒアリング調査

2.1 調査方法

各業種の産業廃棄物の種類や量、再資源化量、最終処分量等に関する実態調査は、例えば財団法人クリーン・ジャパン・センターが毎年調査し、公表している⁸⁾。しかし、異業種間プロセスリンクの可能性を検討するためにはそれらの結果のみでは必ずしも十分でないと考え、製紙、住宅、食品、印刷、製薬、ガラスの6業種に関して個別企業の環

平成17年4月28日受付 平成17年6月13日受理 (Received on Apr. 28, 2005; Accepted on June 13, 2005)

* JFE テクノリサーチ (株) (JFE Techno-Research Corporation, JFE Bldg. 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku Tokyo 100-0005)

* 2 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577)

境担当者から削減ニーズの高い廃棄物を中心に直接ヒアリングを行った。対象の個別企業は製紙A社、住宅B（木質系）、C（鉄骨系）、D（鉄筋コンクリート系）社、食品E社、印刷F社、製薬G社、ガラスH社で、いずれも大手もしくは中堅企業である。また、個別企業が特異な情報とならないように、必要に応じて関連する業種の業界団体からも情報を収集した。これらのヒアリングは2002年後半から2003年前半にかけて実施した。

2・2 調査結果

2・2・1 製紙業

A社a工場では廃棄物のリサイクルに積極的に取り組み、ペーパースラッジ焼却灰をセメント原料として異業種間資源循環を行うなどゼロエミッション化が進んでいる。しかし、焼却炉を持たない他の工場では焼却処理を依頼しており、その有効活用が課題との認識であった。

また、日本製紙連合会へのヒアリングでは、業界として削減ニーズの高い廃棄物は排出量の多い有機性汚泥（ペーパースラッジ）と燃え殻であることがわかった。製紙業界における2001年度の産業廃棄物実態調査⁹⁾によれば、絶乾の廃棄物は多い順に有機性汚泥（ペーパースラッジ）； 1.60×10^6 t、もえがら； 3.57×10^5 t、ばいじん； 2.40×10^5 t、木くず； 1.17×10^5 tである。発生量の最も多いペーパースラッジは、現在でも自社内での焼却発電以外に、セメント原料、土壌改良材、製鉄用保温材等に有効利用されているが、その割合は43.7%⁹⁾であるので、さらなるリサイクルというニーズが高い。

2・2・2 住宅業

社団法人プレハブ建築協会傘下の住宅メーカー、B、C、D社ともに廃棄物の削減を最優先課題としており、設計製造段階での余剰材（廃材）を最小化する方針が標準化されている。また、新築系の廃棄物のみならず解体系での分別と再資源化のシステムが独自に構築されているが、削減ニーズの高い廃棄物は新築時よりも解体時の方が多く、その中でも廃石膏ボードと廃木材が課題との認識である。国土交通省の2000年の建設廃棄物品目別排出量調査¹⁰⁾によれば建設発生木材の量は 5×10^6 tで、社団法人石膏ボード工業会の推計¹¹⁾によれば2003年の廃石膏ボード排出量は 1.3×10^6 tである。

2・2・3 食品業

食品業は典型的な多品種小ロット産業であり、そこから発生する廃棄物も様々な形態を有する。大手食品メーカーE社へのヒアリングでは、発生廃棄物は汚泥が全体の65.8%と最も多く、以下廃酸・廃アルカリ25.5%、燃え殻・ばいじん1.5%、動植物性残渣1.3%であった。削減ニーズの高い廃棄物として、E社では廃イオン交換樹脂をあげた。現状では特定成分の抽出や脱色工程などで使用された後、委託処理（焼却、埋立）している。なお、イオン交換樹脂生産量は国内メーカーヒアリングや輸出入通関統

計等から $17000 \sim 20000 \text{m}^3$ と推定できるので、現状のイオン交換樹脂の製品カタログから平均かさ比重を0.7、平均水分を50%と仮定すれば、 $6 \sim 7 \times 10^3 \text{t/年}$ と計算される。イオン交換樹脂の寿命を1年と仮定することで、廃イオン交換樹脂量が生産量に等しいとした。

また、クリーン・ジャパン・センターの平成12年実績調査⁷⁾では、食料品製造業の廃棄物発生量 $1.8 \times 10^7 \text{t}$ の内訳として汚泥が全体の85%と多く、次いで動植物性残渣7.4%、紙くず1.5%、廃酸1%の順である。汚泥は、食料品製造工程での洗浄水などに食料品の一部が溶出または混入し、COD、BOD低減のための排水処理によって生じた有機性汚泥が主と考えられる。

2・2・4 印刷業

大手印刷メーカーF社は紙や包装材を対象とした印刷事業に加え、エレクトロニクス系事業も手がけている。F社の年間廃棄物発生量は紙くず $2.3 \times 10^5 \text{t}$ 、廃酸 $2.4 \times 10^4 \text{t}$ 、廃プラスチック $2.2 \times 10^4 \text{t}$ の順であるが、中間処理や再資源化することによって最終処分となる廃棄物はそれぞれもえがら $9 \times 10^2 \text{t}$ 、残渣 $1.9 \times 10^3 \text{t}$ 、もえがら $3 \times 10^2 \text{t}$ に減少する。廃棄物の削減ニーズは、一般に廃棄物処理パートナーの存在の有無に依存する。その点で、印刷業で大量に発生する紙くずや廃プラスチック等の再資源化については廃棄物処理メーカーとの間でパートナーシップが確立しているので、さらなるリサイクル比率向上は分別回収率アップ等、自社内での努力にかかるとの認識である。しかし、焼却処理後発生する焼却灰の処理についてはF社ではパートナーが少なく、削減ニーズが高い。

一方、社団法人日本印刷産業連合会による1997年の調査¹²⁾によれば、製版、印刷、製本・加工といった印刷工程で排出する年間の廃棄物は印刷業全体で紙くず $1.0 \times 10^6 \text{t}$ 、廃プラスチック $3.6 \times 10^5 \text{t}$ 、廃油 $6.8 \times 10^4 \text{t}$ 、廃酸・廃アルカリ $4.8 \times 10^4 \text{t}$ 、金属くず $3.3 \times 10^4 \text{t}$ の順である。印刷メーカーから直接発生する焼却灰はそれより少なく、調査結果には発生量も記されていない。

2・2・5 製薬業

G社の原薬工場、原薬および製剤工場がある工場（原薬+製剤工場）の2箇所ヒアリングを行った。医薬品の原料を製造する化学工場である原薬工場の主な廃棄物はフッ素含有中和汚泥（無機汚泥）ならびに濃縮廃液であったが、自社発生廃棄物では最大なこと、ならびに自社処理と外部委託が共存することなどから、削減ニーズが高い。原薬+製剤工場では紙くず、乾燥汚泥、廃プラスチック、焼却灰等の廃棄物が発生しているが、再資源化できない可燃性廃棄物は自社焼却設備で処理し、再資源化可能な廃棄物は外部委託処理する体制が確立しており、その中には製鉄メーカーも含まれる。

2・2・6 ガラス業

ガラス部門以外に電子・ディスプレイ部門や化学品部門

Table 1. Wastes required for reduction in 6 industries in Japan.

Industry	Company	Waste required for reduction	Total emission in Japan (t/year)
Paper	A	Paper sludge	4×10^6 (2001)
House	B, C, D	Construction and demolition waste wood	5×10^6 (2000)
		Waste Plaster board	1.3×10^6 (2003)
Food	E	Waste ion exchange resin	$6-7 \times 10^3$ (2002)
Printing	F	Incineration ash	-
Pharmaceutical manufacturing	G	Inorganic sludge	-
Glass manufacturing	H	Inorganic sludge	-

を有する大手ガラスメーカーH社のガラス製造工程では、原料のほぼ100%が製品化されるため削減ニーズの高い廃棄物はないとのことであった。しかし、化学品製造部門においては、カルシウム系の排水処理の中和汚泥（無機汚泥）は現在路盤材として利用されているものの、より有効な資源化が望ましいという意味で削減ニーズが高い。

2.3 ヒアリング結果のまとめ

以上、削減ニーズの高い廃棄物のヒアリング調査結果と全国レベルにおけるその排出量をまとめてTable 1に示す。ヒアリング結果からは、製紙業でペーパースラッジ、住宅業で廃石膏ボードと廃木材、食品業で廃イオン交換樹脂、印刷業で焼却灰、製菓業で無機汚泥、ガラス業で化学品部門から排出される無機汚泥の削減ニーズが高いという結果を得た。ヒアリングは各業種で1~3社しか行っておらず、業種全体を十分反映しているか不明な部分も残るが、少なくとも現時点での削減ニーズの一端は見出せたと考えられる。

3. 製鉄プロセス活用による廃棄物リサイクルの可能性検討

3.1 ヒアリングで抽出した削減ニーズの高い廃棄物のリサイクル処理技術

ペーパースラッジ：ペーパースラッジのリサイクル例には、焼却発電¹³⁾、セメント製造時の原料、土壌改良材としての利用¹⁴⁾などがあり、製鉄プロセス活用に関しては、焼結プロセスへの適用^{15,16)}がある。ペーパースラッジに含まれる繊維質、粘土質によって焼結鉄の造粒性、通気性が改善され、生石灰の低減が可能となる。

廃石膏ボード：新築時の石膏ボード廃材は紙と石膏を分離後、石膏は石膏ボード原料としてリサイクルされるが、解体時のそれは他の廃棄物との分別が困難であり、リサイクルが進んでいない¹⁷⁾。製鉄プロセスへの活用も含めて今後早急に技術開発を進める必要がある。

廃木材：廃木材はバイオマス発電¹⁸⁾やパーティクルボー

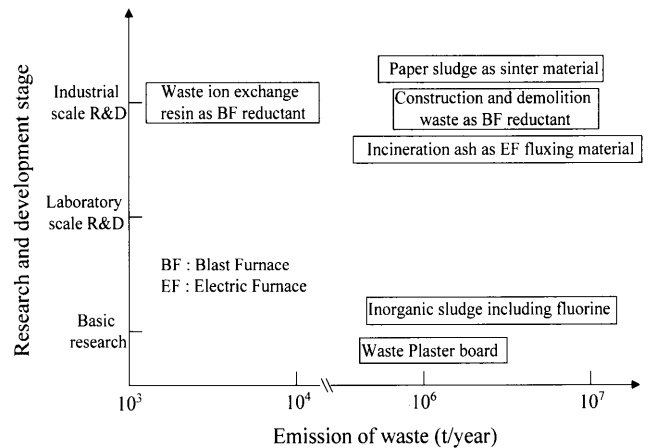


Fig. 1. Relation between R&D stage and amount of waste emission.

ド¹⁹⁾への利用などが確立されているが、製鉄プロセスの活用例として廃プラスチックと同様、大量処理が可能な高炉へ還元剤として吹き込む方法のパイロットプラント実験がなされている^{5,20)}。また、製鋼炉排ガスの活用による廃木材の炭化と排ガス浄化システムの構築を目指した要素研究²¹⁾も行われている。

廃イオン交換樹脂：廃プラスチック総量を1000万t/年とした場合、推定6000~7000t/年発生する廃イオン交換樹脂量の占める割合は0.1%未満であり、しかも小ロットで排出され、スルホン酸基など鋼に有害な硫黄分が含まれる。廃イオン交換樹脂発生量が少ないことから、廃プラスチックの高炉⁴⁾またはコークス炉⁵⁾原料化に際して廃プラスチックに混合して使用することが考えられる。

焼却灰：焼却灰は有害成分溶出防止といった無害化処理のために溶融してスラグ化²²⁾したり、セメント原料²³⁾として使用される。しかし、最近製鉄プロセスを活用した例として、埼玉県廃棄物広域処分対策協議会から委託を受けて鉄鋼メーカー、I社が行った既設電気炉活用による焼却灰の実機規模での溶融処理実験²⁴⁾がある。これは、製鋼用電気炉の操業時に、造滓剤の一部として焼却灰を加え最終的に溶融スラグとするか、または、昼間のような製鋼の非操業時間に溶融処理してスラグ化を図る方法であり、製鉄設備インフラが活用できる利点を有する。留意点は、焼却灰に含まれるリン、硫黄、銅などの有害重金属による鋼の汚染であり、この観点から焼却灰添加量が制限される。

無機汚泥：製鉄プロセスを活用したフッ素含有無機汚泥の処理技術には、フッ素混入したステンレス系スラッジを溶融還元炉で還元処理することにより、鉄、クロム、ニッケル等の金属分を回収しつつフッ素溶出を抑制したスラグを製造する方法²⁵⁾があるが、要素研究レベルにとどまる。

製鉄プロセス活用に関するまとめ：削減ニーズの高い廃棄物に関して、製鉄プロセス活用によるリサイクル処理技術の研究開発段階と廃棄物発生量の関係をFig. 1に示す。

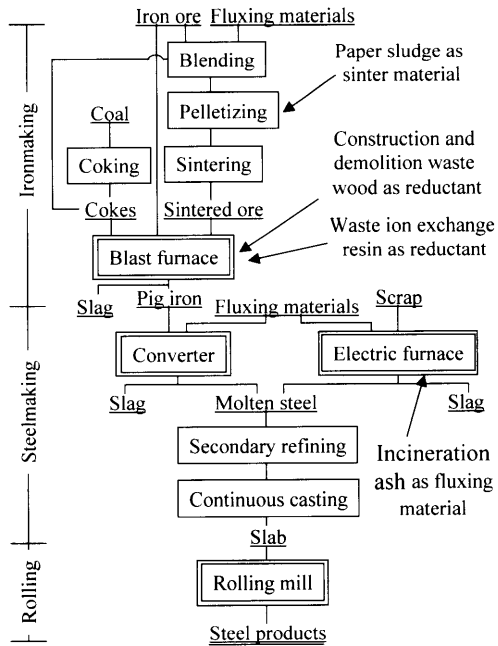


Fig. 2. Manufacturing process flow of steel products and utilized points of wastes required for reduction.

なお、ペーパーセラッジは含水率60%⁹⁾とした。縦軸が上位ほど研究開発段階が進み、実用化の可能性および時期が高いと推定できるが、今回抽出した廃棄物の製鉄プロセス活用によるリサイクル法では、ペーパーセラッジの焼結原料化、廃木材の高炉還元剤利用、焼却灰の製鋼用電気炉による溶融スラグ化が、実用化可能性が高くしかも処理量も多いといえる。

ヒアリング調査で抽出した削減ニーズの高い廃棄物の製鉄プロセス利用による処理技術が、製鉄プロセスフローのどの工程で使われるかを図示すると、Fig. 2のようになる。製鉄、製鋼といった高温・大量処理工程での利用となることがわかる。

3.2 製鉄プロセス活用による廃棄物リサイクル可能量の推算と物流の基礎検討

3.2.1 ペーパーセラッジの焼結プロセスへの利用

我が国の焼結鉱生産量 1.04×10^8 t/年、焼結歩留を0.9、実機実験から^{15,16)} 装入原料あたりのペーパーセラッジ添加率0.4% (ドライベース) とすると、焼結プロセスへのペーパーセラッジ利用可能量は $1.04 \times 10^8 / 0.9 \times 0.004 = 4.6 \times 10^5$ t/年と推算される。2.1節で述べたようにペーパーセラッジ排出量が 1.60×10^6 t/年であるから、 $(4.6 \times 10^5) / (1.60 \times 10^6) \times 100 = 30\%$ 程度が焼結機へ利用可能であることがわかる。

また、標準的な製鉄プロセスにおける焼結機を想定して、一基あたりのペーパーセラッジの処理量を推算すると、有効面積 400 m^2 、操業度 $1.6 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、350日/年稼働、焼結歩留90%、ペーパーセラッジ添加率0.4% (ドライベース) の条件で、ペーパーセラッジ処理量は $1.6 \times 400 \times 24 \times 350 /$

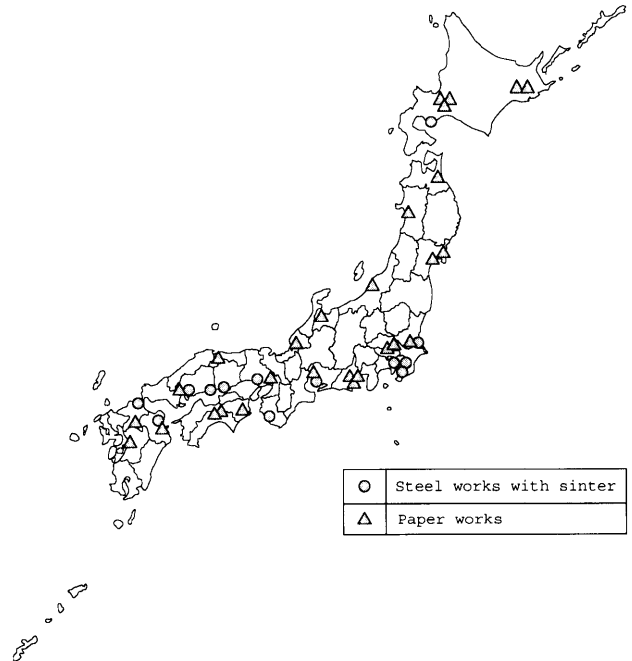


Fig. 3. The locations of steel works with sinter and paper works with production capacity of 3×10^5 t/year or more.

$0.9 \times 0.004 = 2.4 \times 10^4$ t/年 (ドライ) (焼結鉱生産量は 5.4×10^6 t/年) となる。国内の紙生産量 3×10^7 t/年、ペーパーセラッジ発生量 1.6×10^6 t/年 (ドライベース) であるから、焼結鉱生産量 5.4×10^6 tの焼結機に一对一で対応する製紙工場規模は $3 \times 10^7 / 1.6 \times 10^6 \times 2.4 \times 10^4 \text{ t} = 4.5 \times 10^5$ t/年となる。焼結機を有する製鉄所と紙・板合計生産量が 3×10^5 t/年以上の製紙工場所在地をFig. 3に示す。各製鉄所の50 km圏以内に大手製紙工場が分布している場合が多く、ペーパーセラッジの焼結プロセスへの利用は物流とのマッチングの面からも有望な方法と言える。大手製紙メーカーではペーパーセラッジを焼却することでサーマルリサイクルを図り、残渣の焼却灰をセメント原料等に活用しているのが現状である。しかし、中小の製紙メーカーには自社焼却設備がなく、残渣焼却灰のセメント利用に関しても種々の焼却灰との競合といった問題があるので、今後焼結プロセスへの利用の検討が進むと考えられる。

3.2.2 廃木材の高炉還元剤への利用

高炉での廃木材利用原単位を $10 \text{ kg}/\text{t}$ -銑鉄²⁰⁾、銑鉄生産量 8×10^7 t/年とし、我が国の高炉すべてに使用するとすれば、 $10 \times 8 \times 10^7 \times 10^{-3} = 8 \times 10^5$ t/年の廃木材がリサイクル可能となる。これは2.2節に示した建設発生木材量 5×10^6 t/年の16%に相当する。

高炉を有する製鉄所所在地と主だった地域から発生する推定月間廃木材量をFig. 4に示す。廃木材の推算は、国土交通省の建設統計月報²⁶⁾ (2002年1月~6月分)にある住宅解体面積に相当する減失住宅面積と全国解体工事業団体連合会の調査した単位面積あたりの廃木材発生量²⁷⁾、

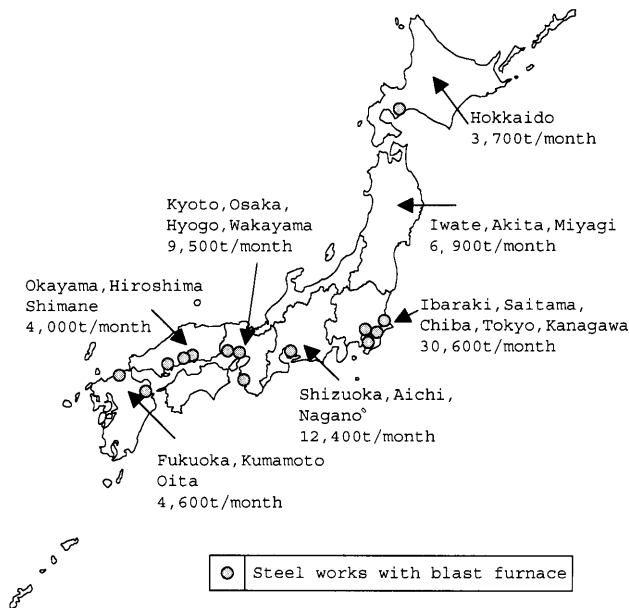


Fig. 4. The locations of steel works with blast furnace and emission of construction and demolition waste wood near steel works.

87.5 kg/m², を乗じて行った。図からわかるように、茨城県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県からなる関東圏は廃木材発生量が30600 t/月と、他の地方に比べて高く、天候の影響も小さい上に4製鉄所が立地しており、物流の点から有望である。関東圏に次いで発生量が多い中部圏（静岡県、愛知県、長野県の合計）、近畿圏（京都府、大阪府、兵庫県、和歌山県の合計）も製鉄所が立地しておりこれらも可能性がある。

3・2・3 焼却灰の既設電気炉操業への利用

電気炉での鋼製造時に一般焼却灰を造滓剤の一部として用いる場合、銅などの重金属の鋼での許容量には余裕があるものの、リンや硫黄といった不純物による溶鋼汚染の問題から添加量が30 kg/t-スクラップに制限される²⁴⁾。したがって、我が国の電気炉鋼用スクラップの年間使用量を 3×10^7 t/年とすれば、 $30 \times 3 \times 10^7 \times 10^{-3} = 9 \times 10^5$ t/年の一般焼却灰処理が可能である。さらに、製鋼用電気炉の約1000万 t/年の生産余剰設備²⁸⁾を用いて焼却灰を溶融処理して溶融スラグ化する場合、鋼の電力原単位約300 kWh/tに対して、約1200 kWh/t²⁴⁾と4倍になる。電力原単位が生産量に比例すると仮定すれば、余剰電気炉を用いて灰溶融化する場合、 $1 \times 10^7 / 4 = 2.5 \times 10^6$ t/年の焼却灰処理が可能となる。以上の造滓剤活用と余剰電気炉操業を合わせると、 3.4×10^6 t/年になり、一般焼却灰量（都道府県で最終処分される焼却残渣量²⁹⁾ 5.7×10^6 t/年の60%程度の処理ポテンシャルを有することがわかる。また、スクラップ1 tあたりの焼却灰処理原単位は $3.4 \times 10^9 / 3 \times 10^7 = 113$ kg/tと見積もられる。

高炉や焼結機を有する規模の大きい一貫製鉄所は臨海型で数も限られ、いわゆる太平洋ベルト地帯に偏在している

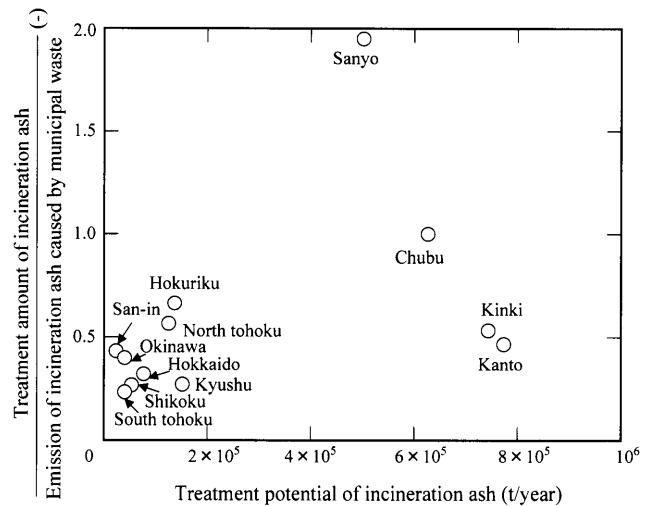


Fig. 5. Comparison of possible recycling amount of incineration ash of municipal solid waste to molten slag by electric furnace between each district in Japan.

のに対して、規模の比較的小さい電気炉製鋼工場は約80事業所が消費地を中心に全国に分布している。したがって、都市から発生する一般焼却灰の処理に製鋼用電気炉を活用する方法は物流の面から有利であると思われる。

全国の電気炉による鋼材生産量³⁰⁾を地方ごとに分けて集計し、上述の焼却灰処理原単位113 kg/tを乗ずることによって各地方の焼却灰処理能力を算出する一方、環境省の焼却残渣に関する各都道府県のデータ²⁹⁾から各地方ごとの焼却灰発生量を算出した。各地方の焼却灰発生量に対する製鋼用電気炉による焼却灰処理能力を縦軸とし、横軸に製鋼用電気炉による焼却灰処理能力をとって、Fig. 5に示す。図から、山陽圏は焼却灰発生量にほぼ比例する人口に比して電気炉製鋼が盛んであるため、電気炉を活用すれば焼却灰処理が全量可能という結果となり、中部圏もほぼ全量が可能である。しかし、近畿、関東圏は焼却灰処理能力が大きいものの、焼却灰発生量も増加するので電気炉活用による焼却灰処理能力割合は他の地方と同程度になった。

3・2・4 製鉄プロセス活用による廃棄物リサイクル可能量のまとめ

以上、ペーパースラッジの焼結プロセスへの利用、廃木材の高炉還元剤への利用および焼却灰の既設電気炉操業への利用に関して、全廃棄物発生量、リサイクル可能量ならびに製鉄プロセス利用の場合の処理可能割合をまとめてTable 2に示す。

3・3 製鉄プロセス活用による廃棄物処理システムのCO₂排出量評価

3・3・1 ペーパースラッジの場合

ペーパースラッジの焼却発電の場合を基本に、ペーパースラッジの焼却発電後に焼却灰をセメント原料に使用する場合と、ペーパースラッジを焼結鉱原料として使用する場

Table 2. Possible recycle amount by using manufacturing process of steel products.

Waste	Manufacturing process of steel products	Total emission in Japan, x(t/year)	Possible treatment amount by manufacturing process of steel products, y(t/year)	100y/x (%)
Paper sludge	Sinter material	4×10^6	1.2×10^6	30
Construction and demolition waste wood	Reductant of blast furnace	5×10^6	8×10^5	16
Incineration ash of municipal solid waste	Molten slag by steelmaking electric furnace operation	5.7×10^6	3.4×10^6	60

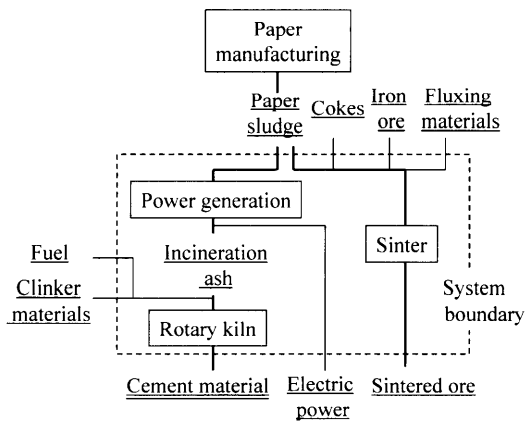


Fig. 6. Process flow of paper sludge recycling and its system boundary.

合のCO₂排出量を計算する。今回の計算のシステム境界をFig. 6に示す。水分60%を含むペーパースラッジの有機分24%¹⁴⁾はすべてセルロースとし、焼却発電効率；15%，電力によるCO₂発生量；0.469 kg CO₂/kWh³¹⁾，ペーパースラッジ焼却灰中のCaO；31%¹⁴⁾，石灰石中のCaO；52.8%³²⁾，石灰石脱炭酸起源CO₂発生量；453 kg CO₂/t³³⁾，焼結原料化によってペーパースラッジ発熱量相当の коксが低減する，等の仮定及び数値群を用いた。セメント原料化する場合，ペーパースラッジ焼却灰による石灰石の置換率は(31/52.8)kg石灰石/kg焼却灰となった。

ペーパースラッジの各リサイクル方法でのCO₂発生量を，焼却発電の場合をベースとしてFig. 7に示す。図から，ペーパースラッジの焼却発電のみの場合に比べて，焼結機原料利用の場合は，生石灰と燃料コークス比削減効果により550 kg-CO₂/t-ペーパースラッジのCO₂削減となる。一方，焼却発電後に焼却灰をセメント原料として利用する場合も石灰石の削減効果によりCO₂発生量が低減するが，ペーパースラッジは水分の増加につれてCaO含有量が少なくなるためにその量は焼結機利用の場合の約1割に留まった。

3.3.2 廃木材の場合

廃木材を焼却発電する場合をベースに，高炉での還元剤利用の場合のCO₂排出量を計算する。システム境界は

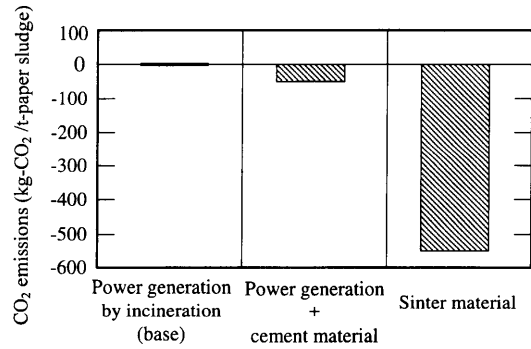


Fig. 7. Reduction of CO₂ emissions for each paper sludge recycling.

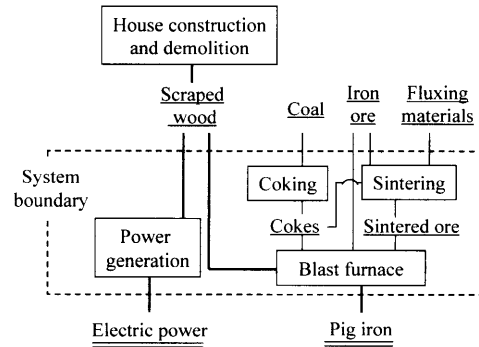


Fig. 8. Process flow of construction and demolition wood recycling and its system boundary.

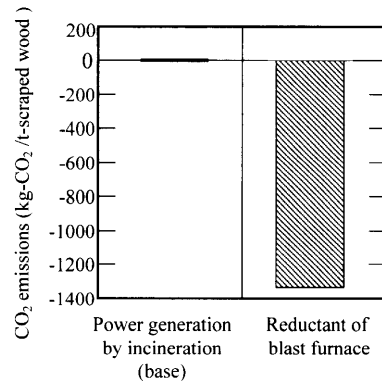


Fig. 9. Reduction of CO₂ emissions for each scraped wood recycling.

Fig. 8のように決めた。計算条件として焼却発電効率15%，廃木材の高炉におけるコークスとの置換率0.5²⁰⁾，ドライベースの廃木材中の発熱量 1.92×10^4 kJ/kg³⁴⁾等を用いた。

廃木材の焼却発電と高炉還元剤利用の場合のCO₂発生量を，焼却発電をベースとしてFig. 9に示す。焼却発電に比べて高炉還元剤利用の場合はコークス比削減効果によるCO₂発生量低減量が大きく，廃木材1tあたり1300 kg-CO₂の削減となった。

3.3.3 焼却灰の場合

焼却灰をセメント原料として使用する場合をベースに，製鋼用電気炉で熔融スラグ化する場合のCO₂排出量を算出する。システム境界はFig.10のようである。計算条件とし

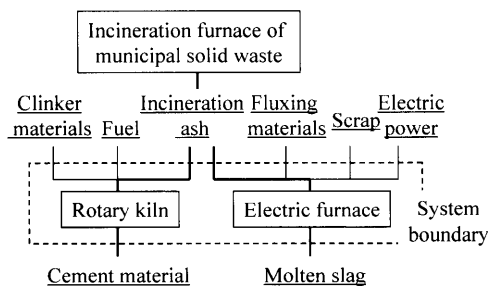


Fig. 10. Process flow of incineration ash recycling and its system boundary.

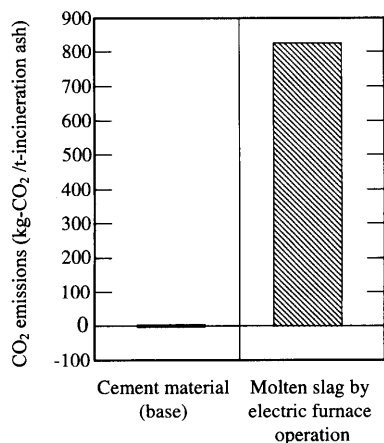


Fig. 11. Reduction of CO₂ emissions for each incineration ash recycling.

て焼却灰中のCaO 26.3%³²⁾、電気炉における熔融スラグ化の電力原単位 1200 kW h/t 焼却灰²⁴⁾、炭素質電極原単位 9 kg/t 焼却灰²⁴⁾等を用いた。一般焼却灰による石灰石の置換率は(26.3/52.8)kg石灰石/kg一般焼却灰となった。

焼却灰のセメント原料利用と製鋼用電気炉での熔融スラグ化の場合のCO₂発生量を、セメント原料利用をベースにFig.11に示す。なお、熔融スラグ化の目的は廃棄物として最終処分する際の容量減少や有害成分溶出防止の他に路盤材としての有効利用があるが、現状では後者の利用例が少ないことから、廃棄物として処理する場合のCO₂発生量を考える。セメント原料の場合は石灰石の削減でCO₂発生量が低減するのに対して、熔融スラグ化の場合は焼却灰熔融熱源に電力を要し、電極損耗によってもCO₂が発生するので、820 kg/t-焼却灰のCO₂発生量増となった。

4. まとめ

削減ニーズの高い廃棄物の発生状況を製紙、住宅、食品、印刷、製薬およびガラス業の個別企業1ないし3社にそれぞれヒアリングし、抽出された廃棄物を鉄鋼プロセスの活用によってリサイクルする可能性に関して、その量や環境負荷量を検討した。

(1) 製紙業でペーパースラッジ、住宅業で廃石膏ボードと廃木材、食品業で廃イオン交換樹脂、印刷業で焼却灰、

製薬業で無機汚泥、ガラス業で化学部門から排出される無機汚泥の削減ニーズが高い。

(2) 抽出した廃棄物の製鉄プロセス活用によるリサイクル法では、ペーパースラッジの焼結原料化、廃木材の高炉還元剤利用、焼却灰の製鋼用電気炉による熔融スラグ化が、実用化可能性が高く、処理量も多い。

(3) 上記の各製鉄プロセスを活用すれば、鉄鋼製品の品質に影響する成分等の十分な管理が必要であるが、ペーパースラッジの約30%、廃木材の約16%、一般焼却灰の約60%の処理が最大可能と推測され、しかも物流との整合性も取れる。

(4) ペーパースラッジの焼結原料化は焼却発電と灰のセメント原料化の組み合わせよりもCO₂排出量が少なく、廃木材の高炉利用も同様に焼却発電より少ない。しかし、焼却灰の製鋼用電気炉による熔融スラグ化はセメント原料化に比べてCO₂排出量が多いと推算される。

本研究は、川鉄テクノロジー(株)(現JFEテクノロジー(株))が平成14年度に行った経済産業省からの委託研究をもとにしたものであり、アドバイスをいただいた(社)日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会の三洋アクアテクノ(株)上杉浩之博士、新日本製鐵(株)高松信彦氏、大阪大学客員教授丸川雄浄博士、神鋼リサーチ(株)上條網雄博士、JFEホールディングス(株)八木竜一氏に対して、またヒアリングにご協力いただいた個別企業の方々、情報収集にご協力いただいた日本製紙連合会、(社)プレハブ建築協会、(社)日本印刷産業連合会、日本製薬工業協会、板硝子協会に感謝いたします。

文 献

- 1) A.Hayashi: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **2** (1997), 401.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 財団法人金属系材料研究開発センター: トータルエネルギー&マテリアルコントロールに関する調査(循環型社会構築可能性調査)調査報告書, (1998), 3.
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 財団法人金属系材料研究開発センター: トータルエネルギー&マテリアルコントロールに関する調査II(循環型社会構築可能性調査)調査報告書, (1999), 8.
- 4) H.Hotta: *NKK Tech. Rep.*, **179** (2002), 126.
- 5) 高松信彦: 鉄鋼技術における重点化環境技術, 日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会シンポジウム「鉄鋼環境技術の将来展望—エコ・コンビナートをめざして—」, 日本鉄鋼協会, 東京, (2003), 1.
- 6) H.Gotoh, T.Koseki, T.Ibaraki, E.Matsukuma and H.Kondoh: *Nippon Steel Tech. Rep.*, **376** (2002), 10.
- 7) H.Uesugi, T.Suginaka, M.Fujiwara, H.Kuwauchi and M.Hirao: *Energy Resource*, **24** (2003), 56.
- 8) 財団法人クリーン・ジャパン・センター: 「産業廃棄物(鉱業廃棄物)・有価発生物の実態調査」業種別調査結果の概要(平成12年度実績), (2002), 8.
- 9) Environmental Technology Committee, JAPAN TAPPI, Industrial Wastes Committee, Japan Paper Association and Environmental Protection Committee, Japan Paper Association: *Jpn. TAPPI J.*, **57** (2003), 1646.
- 10) 国土交通省総合政策局: 建設リサイクルの推進について, (2003).
- 11) 社団法人石膏ボード工業会: 廃石膏ボード排出量の推計,

- (2002).
- 12) 社団法人日本印刷産業連合会：平成9年度印刷産業における環境負荷低減に関する調査研究，(1998)，3.
 - 13) 日本大昭和板紙株式会社：環境報告書2003，(2003)，24.
 - 14) T.Uchiyama, H.Minoshima, K.Matsushima, M.Otani, Y.Suzuki and Y.Noda: *Hokkaidoritsu Kogyoushikenzyo Hokoku*, **298** (1999), 125.
 - 15) K.Morioka, S.Sasahara and F.Noma: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 192.
 - 16) T.Matsumura, K.Morioka and F.Noma: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 953.
 - 17) 環境省：廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査報告書，(2002)，12.
 - 18) K.Yamamoto: *NKK Tech. Rep.*, **174** (2001), 22.
 - 19) M.Asari, R.Suzuki, H.Takatsuki and S.Sakai: Proceedings of the 14th Annual Conference of the Japan Society of Waste Management Experts, (2003), 459.
 - 20) K.Wakimoto, M.Shinagawa, I.Ueno, M.Sato and H.Tsukizi: *Wood Industry*, **57** (2002), 533.
 - 21) T.Kitamura and H.Katayama: *Mokuzai Gakkaishi*, **47** (2001), 164.
 - 22) 徳田昌則：第165, 166回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1997)，101.
 - 23) S.Togo: *Shigen-to-Sozai*, **119** (2003), 41.
 - 24) Saitamaken Haikibutsu Kouikisyobun Taisakuyogikai: Private communication.
 - 25) H.Uesugi, Y.Hara, F.Tanno, T.Nakamura and E.Shibata: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 580.
 - 26) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課：建設統計月報，(2002)，473.
 - 27) (社)全国解体工事業団体連合会：木造建築物分別解体の手引，(2000)，31.
 - 28) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)，財団法人金属系材料研究開発センター：トータルエネルギー&マテリアルコントロールに関する調査III(循環型社会構築可能性調査)調査報告書，(2000)，52.
 - 29) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：日本の廃棄物処理 平成12年度版，(2003)，36.
 - 30) 転換する鉄鋼業 電炉・単圧・特殊鋼編(改訂7版)，産業新聞社，東京，(2001)，8.
 - 31) LCA実務入門，LCA実務入門編集委員会編，社団法人産業環境管理協会，東京，(1998)，152.
 - 32) S.Sano, M.Ichikawa, U.Tamashige, T.Matufuji and N.Tanaka: *J. Jpn. Soc. Waste Manage. Experts*, **13** (2002), 131.
 - 33) 社団法人セメント協会：セメントのLCAデータの概要，(2004)，7.
 - 34) I.Ueno: Private communication.