セメント産業における廃棄物の再資源化*

玉 重 宇 幹**

Wastes recycled in the cement industry in Japan

Takamiki TAMASHIGE

Status of waste recycling in the Japanese cement industry is surveyed. As a core of the industrial clustering, the Japanese cement industry receives a huge amount of waste as raw materials from a variety of industries and households. This is owing to the industry's large production capacity, burning process at high enough temperatures for decomposing dioxins, and versatile receptivity to a wide range of wastes as raw materials due to similarities of chemical compositions between cement raw materials and various wastes. Discussed are examples of waste utilization in the cement industry and the latest technical achievements including heavy metal recovery from municipal incineration ash and direct utilization of garbage and trash as raw materials of cement.

1. はじめに

我が国の廃棄物の発生量は、産業廃棄物、一般廃棄物の合計で年間約 4.5 億トンに達し、その内の約 1.0 億トンが再利用されることなく最終処分場に送られている。近年の環境保護意識と資源枯渇への危機感の世界的な高まりを反映して、廃棄物発生量には頭打ちの傾向が見られるが、景気の回復に伴って生産が拡大すれば、再び増加に転じる可能性もあり、予断を許さない。廃棄物の発生と再利用のレベルが現状のまま推移すると仮定しても、最終処分場の余命は、産業廃棄物で 3 年余り、一般廃棄物でも 8 年余りに過ぎず、なお一層の廃棄物発生抑制と再資源化の進展がなければ、早晩、我が国の国土に廃棄物が溢れ返ることは明らかである。

上述の廃棄物の「量」の問題とは別に、その「質」の問題がある。廃棄物の中には、有害重金属やダイオキシン（または、その成因となる塩素）等が含まれる場合が多い。前記最終処分場の枯渇の最大の要因は、これらの有害物質が最終処分場からの飛散や浸出によって環境を汚染する可能性に対する近隣住民の不安を払拭できないために最終処分場の新規建設が極めて困難なことにある。廃棄物再資源化を行う場合でも、そのプロセスにこれら有害物質を積極的に資源として回収、活用する手段を備えない限り、新たな製品ないし廃棄物の中へ有害物質を順送りすることとなり、真の意味での再資源化は完結しない。

以上に述べた観点からセメント産業における廃棄物再資源化の現状を概観し、最新の実例を紹介したい。

2. 産業廃棄物・副産物のセメント産業での利用とインダストリアル・クラスタリング

平成 10 年度のセメント産業における廃棄物の利用実績は表 1 の通りであり、セメント製造の原燃料、混合セメントの混合材などとして大量に利用されている。その総量は年間 2,440 万トン（平成 10 年度）に達し、これは、国内で発生する全廃棄物の約 6%、最終処分量の約 20%（重量比）に相当する。

表 1 セメント産業における廃棄物の利用実績

廃棄物	セメント産業での利用量 (t/年)
石炭灰	3,779,000
汚泥・スラッジ	1,394,000
未燃灰・ばいじん・ダスト	531,000
鋳物砂	454,000
廃タイヤ	282,000
廃油	131,000
廃白土	90,000
建設廃材	112,000
高炉スラグ	11,353,000
副産石膏	2,426,000
ボタ	1,104,000
非鉄鉱滓	1,161,000
製鋼スラグ	1,061,000
再生油	187,000
その他	305,000
合計	24,371,000

数値は、セメントハンドブック（社）（社）セメント協会）による。

このような大量利用は、セメントの国内生産量が年間 8,220 万トン（平成 11 年度）にも達し、それ以上の数量の原燃料がセメント生産のために使用されていることによる所が大きい。また、利用可能な廃棄物の種類も表 1 に示される通り多岐にわたっているが、これはセメントの必須化学成分が多くの廃棄物に含まれること、多種の廃棄物を組み合わせて使用することにより、その構成比を適正化できること、および可燃性廃棄物に含まれる不燃物もそのままセメント原料として

*平成 12 年 11 月 16 日本会第 105 回例会において発表
**太平洋セメント（株）ゼロエミッション事業部
平成 12 年 9 月 29 日受理

利用できる場合が多いためである。

表1の廃棄物は、そのすべてが産業廃棄物・副産物である。産業廃棄物・副産物の再資源化とは、ある産業で発生する廃棄物・副産物を他の産業の原燃料として利用することである。この廃棄物の授受は、一回で終わるものではなく、例えば、廃棄物利用側で発生した新たな廃棄物を廃棄物発生側へ戻して原燃料として活用する（循環）、あるいは、第三の産業で原燃料として利用する（連鎖）などの関係に基づく異種産業のグループを構成する。この関係をインダストリアル・クラスタリングと呼ぶ。セメント産業は、その大規模生産／処理能力と、廃棄物を原料として利用した場合の成分調整の柔軟性により、大規模、広範囲の産業廃棄物・副産物の再資源化が可能であり、図1に示す通り、インダストリアル・クラスタリングの中核に位置する産業ということが出来る。以下、代表的な産業廃棄物・副産物のセメント産業での再資源化の状況について、述べる。

図1 セメント産業を中核とする
インダストリアル・クラスタリング

2.1 製鉄所／発電所廃棄物・副産物と廃タイヤの利用

セメント産業における産業廃棄物・副産物の原燃料としての利用で代表的なものは、製鉄用高炉から発生する高炉スラグと火力発電所から発生するフライアッシュのセメント原料としての利用である。これらは、その潜在水硬性を活かして高炉セメントおよびフライアッシュセメントの混合材としてそのまま用いることができる他、カルシウム、シリカ、アルミナ源として、粘土や珪石などのセメント製造原料の代替としても利用されている。また、廃タイヤは、重油並みの発熱量

を利して、セメント焼成燃料（石炭、重油）の代替として利用される他、スチールラジアルタイヤに含まれる鋼線も、セメント原料として必要な鉄源としてそのまま利用することができる。これらの利用実績は、図2に示す通りであり、いずれもセメント産業が最大の利用先であることを示している。

上記以外にも、火力発電所排煙脱硫工程の副産石膏が、セメント原料として利用されている。ここで特筆すべきは、石灰石を原料とする排煙脱硫材が、セメント産業自身から供給されることであり、石灰石資源を仲立ちとした緊密な資源循環、インダストリアル・クラスタリングの象徴的な事例と言える。

図2 高炉スラグ、フライアッシュ、廃タイヤ
の利用状況

2.2 廃パチンコ台の燃料利用

我が国の国民的な遊戯産業とも言えるべきパチンコ業界からは、年間約200万台の廃パチンコ台が発生している。廃パチンコ台は、木材、ガラス、プラスチック、金属の複合物であるため、一般の焼却施設では処理が困難であった。セメント会社は、廃パチンコ台を破砕分別して金属とガラス部分はそれぞれのリサイクル業者へ送り、残りの木材とプラスチックをセメント焼成燃料として利用する技術を大手パチンコ台メーカーと共同で開発し、廃パチンコ台の完全再資源化の道を拓いた。

2.3 廃プラスチックの燃料利用

プラスチック加工産業からは、不良品や加工端材などの廃プラスチックが発生する。プラスチックは、セメント焼成で通常用いられる石炭以上の発熱量を持ち、燃料としての価値が大きく、その本格的な利用が始まろうとしている。廃プラスチックには、塊状、板状、フィルムないしシート状など様々な形状があり、また、

その組成によって燃焼性にも大きな相違があるため、実際に燃料としてキルンへ吹き込むまでには、形状組成に応じた破碎（図3）やガス化などの前処理が必要となる。

図3 廃プラスチック破碎機¹⁾

図4 セメント焼成工程における可燃性廃棄物受入口

セメントの焼成工程は、図4に示す通り、複数の燃料受入口を持ち、それぞれ、温度、雰囲気、必要とされる燃焼状態が異なる。このため、主燃料に近い良好な燃焼状態の求められるキルン前部（主バーナ側）からは微粉碎またはガス化した可燃性廃棄物を、酸素濃度が低く燃焼状態への要求が厳しくないキルン後部（窯尻）からは、サイズの大きな可燃性廃棄物を、というような、投入口の使い分けが可能であり、大きなエネルギーを要する微粉碎やガス化などの前処理は最小限で済ませることができる。

現在、セメント産業で利用している廃プラスチックは、組成既知の産業廃棄物であり、塩化ビニールは対象としていないが、ある程度の脱塩素を行い、塩素バイパス（後出）を強化すれば、塩化ビニール含有の容器包装プラスチックであっても、利用可能となる期待が大きい。廃プラスチックからの脱塩素の方法はいくつかあるが、この内、350℃程度の低温で廃プラスチック中の塩素を塩化水素として揮発除去する方法で得られた脱塩素済み分別収集プラスチックを用いたセメント焼成燃料利用技術の開発が（社）セメント協会によって行われている。¹⁾

2. 4 フロン破壊処理

家電製品の断熱材や冷媒として使用されてきたフロンは、高温によって破壊されることが知られているが、単純焼却でこれを行うと、破壊の結果発生した塩化水素、フッ化水素などの有害ガスの処理の問題が生じる。これに対し、セメント焼成工程を利用した場合は、破壊に必要な高温が得られると同時に、工程中に多量に存在するカルシウムによって、これら有害ガスを塩化カルシウム、フッ化カルシウム等として無害化することができるため、安全であり、また、既存のセメント焼成キルンがほぼそのまま利用出来るために低コストでの処理が可能である。この技術はセメント会社と東京都との共同研究により実用化され、東京都、埼玉県を中心として処理事業が開始されたが、現在は、民間のフロンも含めて、フロン破壊処理が行われている。

3. 一般廃棄物のセメント産業での利用と

ゼロ・エミッション技術

都市ごみを主体とする一般廃棄物は、構成物質が雑多で、有害重金属やダイオキシン、工程トラブルの原因となる塩素も含まれる場合が多い。また、その組成の時間的変動および地域差が大きく、組成が一定で来歴も明らかな産業廃棄物・副産物と比較して、原燃料としての利用には大きな困難が伴う。また、自治体による自区内処理の原則のため、仮に再資源化の可能な産業があっても、発生元からそこに至るまでの運搬の過程で行政区画を越えることが困難な場合が多い。これらの技術的、人為的阻害要因のために、一般廃棄物の再資源化率は5%程度と、産業廃棄物と比較して遙かに低いレベルにとどまっている。この結果、殆どの一般廃棄物は、最終処分されることになるが、国土の狭い我が国では、その75%以上を焼却によって減容し、その残渣を埋め立て処分している。周知の通り、重金属、塩素を含有する一般廃棄物の焼却は、焼却施設でのダイオキシンの生成や、重金属、ダイオキシンを含んだ焼却灰や飛灰を埋め立てるというリスクを抱え込むことになり、これが最終処分場確保の困難化へ拍車をかけていることは既述の通りである。

都市ごみ焼却灰および飛灰は、Ca, Si, Al等、セメント原料として必要な元素を主要成分として含むため、本質的にはセメント産業での原料としての利用に適している。問題は、これら主要成分と共に含まれる塩素、重金属が、工程トラブルを起こし、また、セメントの品質、安全性に悪影響を与えることである。セメント産業は、この問題を解決するための複数のアプローチを用意しているが、そのキーテクノロジーは、塩素、重金属を工程から抽出除去するだけでなく、それを、

精錬原鉱として再資源化することによって、新たな有害廃棄物を一切、副成、排出させない、文字通りのゼロ・エミッション技術である。この点に焦点をあてながら、セメント産業における一般廃棄物再資源化の実例のいくつかを紹介する。

3.1 セメント焼成工程における塩化物の挙動¹⁾

都市ごみ焼却灰や容器包装プラスチック等に含まれる塩素は、セメント原料に含まれるアルカリ類（Na,K など）と容易に結合して低沸点のアルカリ塩化物を形成する。これらの塩化物は、低温度でキルン排ガス中に揮散するが、キルン後端に接続されたプレヒータ内の排ガスの冷却（原料との熱交換）と共に凝縮、固化して排ガスから分離し、原料粉末とともに焼成炉に戻る塩素循環を形成する。これを放置すると排ガス径路の塩化物濃度が上昇し、その一部が液化してプレヒータ内壁に付着し、深刻な閉塞トラブルを引き起こす。これを防止するためには、循環する塩化物を系外へ抜き出し、循環→濃縮の連鎖を断ち切る必要がある。これは、塩素バイパスと呼ばれる技術により実現される。即ち、塩化物の循環、濃縮過程の中から一定量の排ガスをバイパスさせてサイクロンなどの分級機にかけ、微細な塩化物粒子のみを含んだ排ガスとそれ以外の粗大な原料粉末とに分離、粗大原料粉末はキルンに戻す。微細塩化物粒子はバグフィルタで排ガスから分離されて系外に去り、排ガスは本流に戻る。塩素バイパスは、普通セメントでも広く活用される技術であるが、その目的はあくまでも、塩素の循環濃縮を軽減し塩素起因トラブルを防止することであり、一旦系外に抜き出した塩化物も最終的にはセメントに戻されることになる。即ち、セメントの品質、安全性を維持するためには、焼成工程への塩素の持ち込みそのものを低減するか、抜き出した塩化物を製品へ戻さないことが必要である。前者の事例として都市ごみ焼却灰の水洗脱塩技術、後者には酸アルカリ処理による塩素含有ダスト再資源化プロセスがあり、それぞれ焼却灰／飛灰の普通セメント原料化およびエコセメント原料化のキーテクノロジーとなっている。

3.2 都市ごみ焼却灰の普通セメント原料化¹⁾

普通セメント工場の生産能力は、日産数千トンから数万トンに及ぶ。これに対し、1日当たりの都市ごみ焼却灰および飛灰の発生量は人口100万人の大都市であっても、100トン程度であり、日産1万トンのセメント工場で使用する全原料の1%にも満たない。この程度の量であれば、前述の成分変動の影響も大きくはなく、自区内ないし至近距離に普通セメント工場のある自治体であれば、発生する都市ごみ焼却灰／飛灰の全量をセメント原料として再資源化することが可能であ

る。但し、普通セメントには、JISによる世界で最も厳しい塩素含有量規制（200ppm以下）があるため、数%ないし10数%のオーダーで塩素を含む焼却灰／飛灰をそのまま工程に投入することはできない。水洗による都市ごみ焼却灰の水洗脱塩は、この問題を解決する技術で、水溶性の塩化物を水に溶解後固液分離することにより97%程度の脱塩率が確保される。脱塩後の飛灰は、別に異物除去工程を経た塩素含有の少ない焼却灰と共にセメント原料の一部として利用される。分離濃液は、塩素以外に重金属が含まれるため、排水処理が行われるが、その際のpH調整には、セメントキルン排ガス（CO₂20%程度の酸性ガス）が利用される。この方法で処理された焼却灰および飛灰は、普通セメントの原料に最大3%まで混合使用することができる（図5）。埼玉県熊谷市のセメント工場では、同市発生焼却灰および飛灰を本方式でセメント原料化する実証試験を続けてきたが、近々に県内全域を対象とした本格設備を稼働させるべく、建設、許認可取得などの準備作業を進めているところである。また、上述の通り、生産能力の大きな普通セメントキルンを利用した本方式は、再資源化能力が極めて大きいため、県境を越えた広域から焼却灰／飛灰を持ち込んだ場合でも十分に対応が可能であるが、その実現のためには、自区内処理や県外廃棄物の持ち込み禁止といった従来の考え方からの脱却が必要である。

図5 飛灰水洗脱塩システム³⁾

なお、平成11年7月に公布されたダイオキシン類対策特別措置法および平成12年1月の同法に基づく厚生省令により、都市ごみ焼却灰と飛灰のダイオキシン含有について基準値が定められた。これにより、飛灰からの重金属溶出防止を目的とした厚生省告示の4つの方法の内、高温によるダイオキシン分解の効果の期待できる溶融以外の方法で飛灰を処理している焼却施設

では、何らかの追加対策が必要となった（既設炉については平成 14 年 11 月まで適用除外）。一方、平成 12 年 1 月の同告示の改正により、従来の 4 つの方法に焼成法が追加された。焼成法の要件は 1000℃以上の温度、温度の連続的な記録、排ガス処理施設の設置である。セメント焼成キルンと飛灰水洗脱塩プロセスの組合せは、これらをすべて満たしており、溶融法以外で処理されている既設炉の飛灰を平成 14 年の適用除外終了期間以降も大量、適正に無害化、資源化するための決め手として期待される。

3.3 都市ごみ焼却灰のエコセメント原料化

エコセメントは、都市ごみ焼却灰／飛灰に必要な最小限の天然原料および下水汚泥などの廃棄物を加えて製造するセメントである。生産されるエコセメントの量は、原料となる焼却灰／飛灰と同量ないし 2 倍程度であり、1 つのエコセメント工場の生産規模は普通セメント工場のそれと比較すると一桁ないし二桁小さく、新規に工場を建設する場合でも、小さな投資で済む。即ち、普通セメント工場の利用が困難な地域に、焼却灰／飛灰の再資源化専用のセメント工場を新設する場合に適した手法といえる。図 6 に、その製造フローを示す。

図6 エコセメント製造プロセス

エコセメント方式には、原料に占める焼却灰／飛灰の割合が高いためその組成のバラツキと変動が製品の品質に影響を与えやすいという難点がある。このため、普通セメントでは行われないバッチ単位の慎重な原料調合が行われる。また、焼却灰／飛灰が高率で配合されることに伴い、それらから持ち込まれる塩素、重金属の影響も相応に大きくなる。普通セメントでの水洗脱塩工程は、塩化ナトリウムなどの水溶性塩化物しか

除去ができないため、それ以外の塩化物も総量としては多いエコセメント製造への適用は難しい。そこで、塩素を一旦アルカリ塩化物および重金属塩化物として揮散させ、冷却によって凝縮した微細粒子をサイクロンで原料粉末から分離、除去する方法で塩素の除去を行っている。この原理は、前出の塩素バイパスと基本的に同じであるが、余剰塩素を残さないために、塩素量に見合ったアルカリ（炭酸ナトリウム）を原料に添加する。また、持ち込み塩素量が桁違いに多いため、バイパスではなく、排ガスの全量をサイクロンを通して、最大限の塩化物回収を行う。

図7 塩素含有ダスト再資源化プロセス²⁾

系外へ抜き出した塩化物のほとんどは、NaCl、KClであるが、重金属の塩化物も含まれる。そこで、このダストを出発原料として、含有重金属を高純度で回収しようとするのが、塩素含有ダスト再資源化プロセス（通称「山元還元プロセス」）である。このプロセスでは、重金属塩化物と塩化ナトリウム、塩化カリウムを水溶液状態とした後、硫酸、水酸化ソーダなどを加えて重金属のみを硫化物、水酸化物として沈殿させて分

離するものである。この結果、溶液側には NaCl と KCl のみ残り、完全に無害な排水として放流することも可能となる。硫化物、水酸化物として沈殿側に回収されるのは「鉛産物」と「銅産物」の2つで、それぞれの純金属としての純度は、35%以上であり、そのまま精錬原鉱とすることができる。このプロセスのフローを図7に示す。

最初のエコセメントプラントは、千葉県エコタウンプランの中核として同県市原市に建設中であり、平成13年春に稼働開始の予定である。完成後は、県内で発生する都市ごみ焼却灰／飛灰 6.2 万トン/年と産業廃棄物 2.8 万トン/年を原料として、年間約 11 万トンのエコセメントを生産する。これとは別に、東京三多摩地域広域処分組合により、東京三多摩地域エコセメント化計画が平成 16 年度稼働に向けて進行中である。こちらは、三多摩全域（人口約 380 万人）の市町村から集めた都市ごみ焼却灰／飛灰 12.5 万トン/年から 16.1 万トン/年、18.6 万トン/年のエコセメントを生産する計画である。

3. 4 都市ごみのセメント原料化

以上述べた都市ごみ焼却灰／飛灰のセメント原料化とは別のアプローチとして、都市ごみそのものをセメント原料化する方法がある。この方法では、ごみ収集車で回収されたごみをそのままセメント工場に持ち込むことにより、都市ごみ焼却施設は不要となり、ダイオキシン生成の危険もなくなる。

図8 都市ごみセメント原料化プロセス

このプロセスは、ごみ資源化用とセメント焼成用の2本のロータリーキルンで構成されるが、前者は、遊休のセメント焼成キルンを利用することができる。ゴミ資源化キルンでは通風によって好気性雰囲気が保たれる中でごみの好気性発酵が行われる。この工程の初期には糖分、でんぷん等の炭水化合物と蛋白質が分解し、さらに時間をかけるとセルロース等の難分解性成分も

分解する。投入後3日程度をかけてキルンから排出される時点で、ごみ中の有機物のほとんどが分解されて悪臭が無く、ハンドリングも良好なセメント原料が得られる。この資源化物を隣接のセメント焼成キルンでセメント原料として利用する。このプロセスを図8に示す。

本技術は、埼玉県日高市のセメント工場の遊休キルンおよび稼働キルンを用いて、平成13年2月から1年間の実証試験が行われ、その後本格運転に移行する予定である。

4. 下水汚泥のセメント原料化³⁾

下水汚泥のセメント原料としての利用には、大別して、汚泥焼却灰を粘土代替として原料調合段階で添加する方法と脱水汚泥をそのままキルン後部ないしプレヒータ下部へ投入する方法とがある。前者では、リン等のセメント品質へ悪影響を及ぼす物質が濃縮されるため、原料調合には注意を要する。後者では、セメント工場への荷卸し時および汚泥輸送段階での悪臭飛散防止など、周辺環境への配慮が必要である。消臭減菌対策としては、生石灰を主体とする添加剤を脱水汚泥に添加して混合・熟成処理する方法がある。この技術は、平成4年度「建設省新技術活用モデル事業」に指定され、奈良県に実用化プラントを建設、稼働を待っている。

5. おわりに

産業廃棄物を中心に古くから廃棄物再資源化の先兵となってきたセメント産業であるが、その大量処理能力、工程中の1400℃を越える高温によるダイオキシン破壊能力、広範囲の廃棄物にセメントの必須成分を求めることのできる柔軟性、さらに都市ごみ中の有害重金属をも都市鉱山とも言うべき金属資源に変える重金属回収技術により、今後は都市ごみなど一般廃棄物に関しても、その再資源化の中核となることが期待される。これを実現し、真のゼロ・エミッション、資源循環型社会を構築するために、行政および住民の一層の理解、協力を期待するとともに、引き続き、業界をあげての新技術の開発、改良を継続して行きたい。

参考文献

- 1)玉重宇幹：セメント・コンクリート、643,14-21(2000)
- 2)山本由里子：エコインダストリー、20,3,35-44(1998)
- 3)渡辺孝司：資源処理技術、46,2,23-26(1999)