3

セメント製造における都市ごみ焼却灰 のセメント原料代替としての活用

—塩素化合物の分離を中心として—

Utilization for Raw Meal in Cement Manufacturing
Process of Incinerated Ash from Household Wastes
—Separation of Chlorine Compounds—

伊藤 光弘

Mitsuhiro ITO

Key Words : Incinerated Ash, Household Waste, Raw Meal, Cement, Chlorine, Separation, Condensation

1. はじめに

我々人類の日常生活や各種の産業が排出する廃棄物の量は近年急増の途にあり、このような廃棄物を有効かつ適切に処理することは、現代社会の緊急かつ最重要課題の一つとなっている。

この課題に対し、日本のセメント産業は、これらの廃棄物をセメントの原料または燃料の一部代替として使用することで社会に貢献すると共に、これによって資源エネルギーの節約にも努めている。

しかしながら、廃棄物中には塩素や重金属など、セメント製造には望ましくない物質が無視できない程度に含まれている。このうち重金属は、元素とその含有率によっては、セメントそのものの品質悪化のほか、重金属類の環境中への溶出などが問題になることがある。一方、塩素は都市ごみ焼却灰やある種のプラスチック

ックスに極めて多く含まれており、セメント製造の分野では、セメント品質のみならず製造プロセスの安定性の観点からもっとも厄介な物質とされている。

そこで著者らは、セメント製造プロセスの前段およびセメント製造中で、セメント原燃料中の塩素成分を分離回収する二つの実用規模技術を確立した¹⁻³⁾。本講座では、その具体的な適用として、多量の塩素のほか、重金属やダイオキシンも多く含む廃棄物の代表として「都市ごみ焼却灰」に的を絞り、それを通常のセメント（ポルトランドセメント）原料の一部代替として使い込むための技術について、その概要を述べる。

なお、都市ごみ焼却灰を、セメント原料の一部代替としてではなく、これを主原料として製造する新種セメント「エコセメント」については、別報⁴⁾を参照されたい。

2. セメント製造プロセスの概要

通常用いられるセメント（ポルトランドセメント）の原料には、石灰石のほか、粘土、珪石および酸化鉄などが用いられ（石灰石以外の原料は総称して「粘土原料」と呼ばれる）、製造の最終プロセスで少量の石膏が混ぜられる。

セメント製造プロセスは、図1に示すように三つのプロセスから成り、一つの製造ラインで毎日数千トンのセメントが製造されている。

2000年8月17日受付

太平洋セメント株式会社設備技術部

(〒101-8357 東京都千代田区西神田3-8-1) TEL 03-5214-1600

<著者紹介>

昭和54年同志社大学大学院工学研究科修士課程修了、同年、小野田セメント(株)に入社、平成10年、合併により、太平洋セメント(株)に社名変更、同社設備技術部に勤務、博士(工学)。

専門：粉体工学、特に粉砕および分級技術に関する開発研究。近年ではこれに加え、廃棄物のリサイクル技術に関する開発研究もしている。

図1 セメント製造プロセス

原料プロセスでは原料を適切に配合し、乾燥するとともに、焼成を行なうに必要な細かさ（90 μ m 以下の通過 80 % 程度）まで粉砕が行われる。粉砕された時点で少量が自動かつ連続的にサンプリングされ、蛍光X線によりオンラインで成分分析がなされ、その結果は各種原料の配合設備にフィードバックされている。

焼成プロセスでは、前プロセスで配合・粉砕された原料を焼成し、塊状のセメントクリンカを生成させる。このプロセスの概略を図2に示す。原料は特殊なサイクロンの連結体ともいえるサスペンションプレヒータに送られ、最上段から徐々に下に向かう。その際、サスペンションプレヒータ内の下方に設置されたバーナ、ならびに後段のロータリーキルンやクリンカクーラからの熱によって原料は 850 $^{\circ}$ C 程度まで予熱され、石灰石の主成分である炭酸カルシウムは酸化カ

ルシウムと二酸化炭素に分解される。

分解された原料（酸化カルシウムと粘土原料）は続いてロータリーキルンに入り、その出口に向かって移動する。原料の出口側には微粉炭バーナが設置されており、原料の温度は徐々に高くなり、最も高いところで 1,450 $^{\circ}$ C にも達する。その後クリンカクーラ中で外気の導入により強制的に冷却される。この一連の熱プロセスにおける化学反応により、塊状のセメントクリンカが生成する。

最後に、セメントクリンカは少量の石膏とともに仕上げ粉砕がなされ、セメントになる。

3. 各種廃棄物のセメント製造での活用

現在、日本のセメント製造工場で有効活用されている廃棄物は極めて多種多様であり、これらは大きく分けて、原料の一部として使われるものと燃料の一部として使われるものがある。当然ながら、前者はセメント原料に必要な化学成分のみを有していることが基本条件である。

セメント原料や燃料の一部として従来から最も多く活用されている廃棄物や他産業副産物は、廃タイヤ、高炉スラグ、および火力発電所からのフライアッシュであり、それぞれの使用量は日本での発生量の 29 %、66 %、および 35 % にも達する⁵⁾。もちろん、これら以外にも多くの廃棄物が既に活用されている。

図2 セメント焼成プロセス

一方、近年の日本では、年間約700万トン発生している都市ごみ焼却灰の処理が極めて大きな社会問題になっている。その理由は、これらには塩素含有率が10～20%と高く、かつ重金属やダイオキシンが無視できない程度に含まれているにもかかわらず、有効な処理方法が確立されないまま最終処分場に埋め立て廃棄されているからである。さらに、日本は国土が狭いためにそのような廃棄場所が少なく、埋め立て廃棄できる場所は、日本全体の平均で、あと数年でなくなると見込まれている⁶⁾ことが、この社会問題に拍車をかけている。特に、都市ごみの発生量が多い大都市やその周辺では、廃棄場所が既に満杯に近い状況になっているという事実は深刻な問題である。

すなわち、この灰を有効かつ安全に処理する場所を確保することは、日本において緊急かつ重大な課題である。幸いにも、このような焼却灰において塩素や重金属など以外はセメント原料として有効な化学成分である。したがって、焼却灰に何らかの処置を行なってセメントの原料とすることは、緊急かつ重大な課題を早急に解決する最も有効な方法の一つであると考えられる。

4. セメント製造プロセスでの塩素成分の分離と回収

セメントの原料および燃料から持ち込まれる塩素、アルカリ、硫黄などの揮発性成分は、セメント焼成プロセス内で化合して塩化ナトリウム、塩化カリウム、硫酸ナトリウム、硫酸カリウムなどのアルカリ塩となる。その後、特に塩素化合物はロータリーキルン内の高温域でその大部分が揮発してキルンのバーナで燃焼したガスとともに低温側（原料入口側）であるサスペンションプレヒータへ流れる。揮発したガスは、サスペンションプレヒータに達して温度がある程度まで低くなると周囲の原料粉体表面に凝縮し、これが再度ロータリーキルンの高温域に向かい、再度揮発する。このように、塩素化合物はロータリーキルンとサスペンションプレヒータ間で循環を繰り返す。この循環によって、サスペンションプレヒータとロータリーキルンの連結部付近での塩素濃度は、原料や燃料として供給された塩素濃度に対して100～250倍に濃縮されている^{1, 3)}。

一方、近年のセメント業界では種々の廃棄物を原料や燃料の代替として有効活用することが推進されているため、従来にも増してセメント焼成系に入る塩素化合物の量が増加してきている。その結果、セメント中

に取り込まれる塩素成分も当然ながら多くなっているが、同時に焼成プロセス内を循環する塩素化合物の量も増している。セメント中に取り込まれる塩素の量が著しく多い場合には、セメントやコンクリートの品質を損なう原因になる。また、焼成プロセス内を循環する塩素化合物の量が増えると、原料粉体表面への塩素化合物の凝縮過程で、サスペンションプレヒータにおける最下段サイクロン内壁に液相の塩素化合物を含んだ粉体（Ellestadite； $3(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCl}_2$ など）がコーティングを形成する¹⁾。この現象は、原料やガスの流れを阻害する重大なトラブルを引き起こし、ついには、サスペンションプレヒータに閉塞が起こり、ロータリーキルン系の操業が不可能になる。

これら二つの現象のうち、前者の品質問題よりも後者のコーティングトラブルの方が、先にかつ顕著に現れる。したがって、セメントの原料や燃料中の塩素成分濃度増加は、セメント製造が継続できるか否かの重大な問題に関わることになり、この問題を解決することは極めて重要である。

このような状況下に対応するとともに、処分場の逼迫している都市ごみ焼却灰をセメント原料として有効活用するために、塩素成分を効率的に除去する技術の開発が望まれていた。以下に近年開発された二つの技術を紹介する。

4.1 塩素バイパスシステムの開発^{1, 3)}

セメント製造プロセス中で、塩素成分が揮発および循環して最も濃縮している部分からそれを抽出する方法として開発された「塩素バイパスシステム」のフローダイアグラムを図3に示す¹⁾。このシステムは、プローブ、サイクロン（粗粉回収用分離器）、冷却器およびバグフィルタから構成されている。

これらのうち、プローブは、揮発および濃縮した塩素化合物を含む約1000℃のロータリーキルン排気ガスの極く一部を抽気すると同時に、そのプローブに外気を導入して、抽気された高温ガスを塩素化合物の凝固点（600～700℃）以下の温度まで1次急冷する。すなわちこのプローブは、急冷によって塩素化合物蒸気（大部分が塩化カリウム）をセメント原料粒子表面などに凝縮・固化させる機能をもっている。この粒子を含んだガスは2次冷却器を通してサイクロンに導かれ、塩素凝縮の少ない粗粉は回収されて、再びセメント原料としてロータリーキルン系に戻される。一方、塩素凝縮の多い微粉はガスとともに、3次冷却器でさらに急速冷却され、バグフィルタで捕集される。こ

図3 塩素バイパスシステムのフローダイアグラム¹⁾

れによって、分離および回収された「塩素を多く含む微粉」は系外に出され、ロータリーキルン以降のセメント製造プロセスをバイパスして、セメント製造の最終プロセスで、セメント中の塩素含有量が許容される範囲でセメント製品中に微量混合される。

なお、抽気されてバッグフィルタを通過したガスは、その過程で塩素成分を凝縮・固化して分離するとともに、3段階に分けて最終的に150℃程度まで急速冷却されているために、ダイオキシン類の生成は検出されていない。しかし、このガス中には揮発性の幾らかある硫黄酸化物が凝縮されないまま残っている。これが大気に放散されることを防止するために、塩素バイパスシステムの排ガスは直接大気に開放することなく、セメント焼成系のサスペンションプレヒータ下方部に戻される。これによって、硫黄酸化物はサスペンションプレヒータ内の石灰石粒子（セメント原料）表面に吸収され、硫酸カルシウムとしてセメントクリンカ中に取り込まれる。

図4に、塩素化合物蒸気を含有したロータリーキルン排ガスを、抽気して塩素成分を凝縮させるプローブの概略を示す⁷⁾。このプローブは二重管を形成しており、冷風としての外気は外筒を旋回しながらプローブ先端に達する。ここで冷風の全量が、内筒に回り込み、その中で高温の抽気ガス（約1000℃）と混合し、外部に吸引排出される。この場合、プローブなどに要求される条件としては次の4項目が重要である。

- ①セメント焼成プロセスにおける熱ロスおよび原料ロスを少なくするとともに塩素成分の抽出量を多くするためには、焼成プロセス中で塩素濃度が最も高くかつ原料粒子濃度が低い部分を見極め、抽気量はなるべく少量にしなければならない。
- ②セメント焼成プロセスの熱ロスを少なくするためには、プローブはその冷却用外気がセメント焼成プ

図4 プローブの構造⁷⁾

ロセスに漏れこむことなく、その全量が高温の抽気ガスと一緒に吸引・排出される機能を持たなければならない。

- ③塩素化合物蒸気の凝縮を促進するために、プローブ内筒で両ガスの混合は極めて急速でなければならない。
- ④セメント製造の歩留まりとセメントの品質を低下させないために、このプロセスは、系外に抽出・排出されるダストは可能な限り少なく、かつ塩素の抽出量は可能な限り多くなるように設計されていなければならない。

これらの4項目の条件を満たすためには、「セメント焼成系各部におけるガス中の塩素成分濃度の測定」、「コンピュータによる熱流体シミュレーション」および「プローブで抽出される凝縮粒子の評価」をそれぞれ行う必要がある。

図5は、実操業セメント焼成プロセス中の各部で、原料中の揮発性成分の濃度を分析した例である¹⁾。これによると、揮発性成分の中でも塩素成分が循環によって濃度が最も高くなっており、ロータリーキルン内では99%以上が揮発していることがわかる。また図5に示す焼成プロセスの中で、原料中に濃縮した塩素の最も濃度の高い位置はサスペンションプレヒータとロータリーキルンの連結部であり、この付近に最適抽気位置が存在することになる。この位置で抽気した場合における種々の揮発成分抽出率と抽気率の関係についてシミュレーションを行った典型的な例を図6に示す¹⁾。ここで抽気率とは、「プローブによって抽気する高温のロータリーキルン排ガス量と、ロータリーキルン内の全通気量の比」を意味する。この図によると、バイパス率2.5%で、セメント焼成系に入った塩素成分の約80%を抽出・回収できることがわかる。

図5 セメント焼成プロセス中の揮発性成分濃度分析例¹⁾

図6 揮発性成分抽出率と抽気率 (試算例)¹⁾

図7は、設計したプローブの先端部分で高温のロータリーキルン排ガスと冷風の混合による温度変化を、熱流体シミュレーションによって計算した例を示す⁷⁾。もちろん、このプローブは上記②および③を満たすよう試行錯誤により検討されたものである。この図から、設計したプローブ内では、軸方向のガス流速が40m/sの場合、プローブ先端から約3mあるいは約0.1秒たらずで大部分が混合し、冷却がほぼ完了することがわかる。さらに、図8は、このシミュレーションによって、プローブ先端から焼成プロセスへの冷風の漏出を調べたものであるが¹⁾、その漏出はほとんどないこともわかる。

図9は、プローブ出口で実験的に回収したダストの粒子径とその塩素濃度の関係を積算値で示す。これによると、一つの典型的な例として、10 μ m以下の粒子群には、その質量比率は約30%であるにもかかわらず

図7 プローブ内筒でのガス温度変化 (計算値)⁷⁾

らず、凝縮した塩素のうち約90%がそれらに集中していることがわかる。したがって、プローブから出てきた粒子を約10 μ mで分級し、粗粉側(質量比70%)を再びセメント原料として焼成系に戻し、微粉側(質量比30%)のみを焼成プロセス系外に出すことにより、塩素成分の抽出および回収の効率が高く、かつ系外に出すダスト量を少なくできる。この場合、実操業プラントでの実験によると、系外に排出されるダスト(塩素バイパスダスト)はセメント生産量の約

表1 系外排出ダスト（塩素バイパスダスト）の化学成分分析例¹⁾

主要成分 (%)									
ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
54.5	3.6	2.0	0.5	23.1	1.1	10.2	2.0	29.9	21.9
微量成分 (mg/kg)									
Cu	Zn	Cd	Pb	T-Cr	Cr (VI)	As	V	Hg	Se
379	977	1,110	33,500	28	ND	10.6	16	0.19	592

図8 プローブ先端附近の温度と気流の分布（計算値）¹⁾ 図9 プローブ出口で回収したダストの粒径分布と塩素濃度分布¹⁾

0.02%であった。そのダストの化学成分の分析例を表1に示す¹⁾。この表から、ダスト中には揮発性の高いClとK₂Oが多量に含まれ、両者で約50%を占めることがわかる。また、Na₂OとSO₃も含めた揮発性成分としては約65%にも達する。一方、重金属としては、比較的揮発しやすいCd、PbおよびSeが濃縮していることがわかる。なお、表1において、カルシウム化合物はすべてCaOとして表わしたが、実際にはCaOのほか、一部はCaCO₃やCaSO₄としても存在する可能性がある。また、ClはX線回折分析によるとほとんどすべてがKClとして存在していることが確認されている⁸⁾。

したがって、このダストの主要成分は、KCl以外には大部分がCaOあるいはCaCO₃などセメントに必要な成分であるため、後工程でこれをセメントに微量添加(0.02%前後)してもその化学成分は塩素成分以外ほとんど変化しない。一方、セメント中の塩素成分はJISによって200ppm未満と規定されている。したがって、ダストの添加量もその範囲内にとどめる必要があるが、この添加率を種々にとった実験によると、セメントやコンクリートの品質への悪影響は検出されない⁸⁾。

以上に述べた「塩素バイパスシステム」は既に技術確立が完了し、日本の幾つかのセメント工場に設置され、プロセストラブルの防止と塩素含有廃棄物の有効活用に貢献している。

4.2 都市ごみ焼却飛灰の水洗によるセメント原料化^{2, 3)}

図10に示すようなストーカ型焼却炉はごみ焼却の主要な方法の一つであるが、これによって発生する都市ごみ焼却灰は、焼却炉内の残渣であるボトムアッシュと電気集じん機で捕集された飛灰⁴⁾の二つに大別される。表2にこれらの化学分析例を示す²⁾。この表からもわかるように、ボトムアッシュの塩素含有率は比較的少なく、上述の塩素バイパスシステムをセメント工場に設置するだけで、セメント原料の一部として実用的な量を活用できる。一方、飛灰はセメントとしての有効成分以外に、塩素含有率が著しく高く、塩素バイパスシステムを併用しても、セメント1トンあたりの飛灰使用可能量は1kgが塩素含有率の観点からの限界である。さらに、この飛灰にはセメントやコンク

*) 飛灰には塩素成分のほか、重金属類やダイオキシン類などの有害物も無視できない程度に含まれ、「特別管理一般廃棄物」に指定されている。従来より、厚生省の告示によって中間処理が義務付けられており、これには、①溶融固化、②セメント固化、③薬剤処理、④酸抽出の4種類の方法が示されている。しかし、いずれも埋め立て処理が前提であり、逼迫した最終処分場の延命に繋がるとは言い難い。一方、本報で示す「水洗によるセメント原料化」はその延命に繋がるものであり、平成12年1月の厚生省告示による「前述4項目に対する追加項目」に包含される技術であるとみなされる。

表2 都市ごみ焼却灰の成分分析例²⁾

分類	成 分	単 位	ボトムアッシュ	飛 灰
有害物質	カドミウム	mg/kg	8.0	36.9
	鉛		686	956
	六価クロム		ND	0.4
	ヒ素		5.2	7.9
	総水銀		0.152	1.355
	セレン		—	1.24
生活環境項目	銅	mg/kg	3413	362
	亜鉛		2547	3940
	鉄		45660	5048
	マンガン		692	196
	クロム		361	178
	フッ素		217	601
	リン		8832	2520
その他の	ケイ素	質量%	18.18	5.16
	アルミニウム		9.62	3.23
	カルシウム		17.15	34.49
	マグネシウム		2.35	1.32
	硫黄		0.35	1.11
	ナトリウム		3.65	3.98
	カリウム		2.59	4.70
	チタン		1.51	0.46
	塩素		1.07	13.34
	ダイオキシン類	ng-TEQ/g	0.040	1.86
	ig. loss	質量%	9.1	12.7
	水分		36.3	0.7

注)「水分」以外は乾燥質量ベース

図10 ストーカ型焼却炉の構造

リートに望ましくない重金属類も少なからず含まれているために、使用できる限界はさらに少なくなる。したがって、飛灰をそのままセメントの原料の一部として使用することは量的な面で実用域に達していなかつ

た。

そこで筆者らは、飛灰を水で洗浄して塩素成分と重金属類を水中に溶出させ、残った固形分を脱水によってケーキとしてセメント原料の一部にするプロセスを提案した⁹⁾。そのパイロットプラント（飛灰処理量：15t/日）は国内のあるセメント工場内に既に建設されており、図11はその概略のフローダイヤグラムを示す^{2, 3)}。

このパイロットプラントでは、まず飛灰を温水によって溶解槽で水洗して塩素イオンや重金属イオンを溶出させ、ベルトフィルタを用いて清温水のシャワーによってさらに洗浄しながら固液分離を行っている。この操作によって、塩素成分のうち約97%が除去されたケーキはセメント原料の一部に代替される。このときのシャワー洗浄に用いた水は、前工程の溶解槽で水洗水として再使用される。これらに用いられる水量の合計は飛灰の約4.5質量倍である。なお、ケーキの主成分は、CaO、SiO₂、およびAl₂O₃であり、セメント原料に必要な化学組成である。

図 11 飛灰水洗パイロットプラントのフローダイアグラム^{2,3)}

一方、この水洗操作によって溶出した塩素や重金属のイオンを含む水溶液に、pH 調整用として炭酸ガス (CO₂) を約 20vol % 含んだセメントキルン排ガスを導入することによって、鉛や亜鉛などを沈殿させその固形沈殿物は分離・回収される。さらに、液側はキレート剤や凝集剤を用いた処理も行なわれ、下水排水許容基準を満たして下水道に排出される。これらの操作は、水洗排水の清浄化ということだけでなく、セメントキルンから排出される炭酸ガスの処理という観点でも微力ながら貢献することになる。

ここで重要なこととして、飛灰にはダイオキシン類が無視できない程度に含まれていることが、飛灰の処理をめぐる環境問題や社会問題を引き起こしている大きな要因であるということを考慮しなければならない。幸いにも、この問題に関して、飛灰中のダイオキシン類は水洗によって液側に溶出することなく、その全量が脱水されたケーキ側に残ることが実験によって確認されている。

したがって、セメント原料の一部として活用されるこのケーキは、他のセメント原料とは別ルートで、約 1000℃ の温度域であるロータリーキルン入口部に直接供給される方法が採られている。これにより、ケーキはその後瞬時に 1000℃ 程度まで昇温して、約 30 分かけて最高温度 1450℃ 前後で焼成される。一方、ダイオキシン類は 800℃ 以上でかつ 2 秒以上の滞留で分解されることが多くの実験研究からわかっている^{10,11)}。これより、飛灰中のダイオキシン類はロー

タリーキルン内で充分分解すると判断できる。また、約 1000℃ であるロータリーキルン入口に直接投入することにより、300~400℃ 域におけるダイオキシン類の再合成もほとんどないとみなされる。実際に、パイロットプラントで生成した脱水ケーキを実操業セメントプラントで実用レベルの量を使用した実験においても、セメント焼成系の排ガスからは飛灰ケーキ添加に基づくダイオキシン類は検出されていない。したがって、飛灰の水洗によるセメント原料化プロセスは、ダイオキシン類の処理方法としても有効な方法といえる。

なお、水洗排水中の塩素濃度は 2~3% に達する。現時点でのパイロットプラントでは、この排水はキレート処理などが行われた後、下水道に導かれているが、近い将来スケールアップや横展開を行った場合には、何らかの方法で塩素成分を分離回収することも必要と考えられる。これに関して、水洗排水から 1 価イオン交換膜を用いた電気透析と晶析操作を用いて、塩化ナトリウムと塩化カリウムをそれぞれ高い純度で個別に回収し、残った液は水洗などに再利用するクローズドサーキットの開発が既に進められている^{12~14)}。

5. 塩素バイパスシステムと灰水洗プロセスによる効果

表 3 は、塩素バイパスシステムを設置した実操業のセメント製造プロセスにおいて、セメント原料、ならびに塩素バイパスシステムで回収されたダスト (粗粉

表3 揮発性成分濃度の分析例

	セメント原料	塩素バイパスダスト	
		粗粉 (キルン系へ戻し)	微粉 (セメントに添加)
Cl (%)	0.00590	2.18	21.9
Na ₂ O (%)	0.367	0.690	1.96
K ₂ O (%)	0.463	5.06	29.9
SO ₃ (%)	0.500	8.10	10.2
粉体の 質量比 (%)	100	0.05	0.02
塩素の 質量比 (%)	(100)	18.3	73.6

表4 飛灰水洗パイロットプラントでの化学成分分析結果^{2,3)}

	飛灰	濾液	排水 (下水道放流)	下水排水許容 基準例
有害物質 (mg/kg or mg/l)				
Cd	36.9	0.006	0.015	0.1
CN			< 0.1	1
P			< 0.1	1
Pb	956	32	< 0.01	0.1
Cr ⁶⁺	0.4		0.042	0.5
As	7.9		< 0.001	0.1
T-Hg	1.355	0.0010	0.00010	0.005
Alkyl-Hg			< 0.0005	ND
PCB			< 0.0005	0.003
Ce	1.24		< 0.004	0.1
生活環境項目 (mg/kg or mg/l)				
Cu	362	0.078	0.046	3
Zn	3940	2.8	0.047	5
Fe	5048	0.025	0.027	10
Mn	196	0.002	0.008	10
Cr	178	0.064	0.033	2
F	601		< 0.5	15
BOD			1.1	600
COD			17.2	
N			21	150
P	2520		0.27	20
ヨウ素			0.9	220
SS		220	6	660
PH			7.05	5-9
温度 (°C)			23.8	40
塩素 (ppm)				
	133,400	29,000	27,000	
ダイオキシン類 (ng-TEQ/g or mg-TEQ/l)				
	3.0	0.0000024	0.0000022	

および微粉)について、揮発性成分の含有率を分析した結果を示す。この表より、セメント焼成系外に排出される塩素バイパスダスト(微粉)は、セメント原料

に対して、量比で0.02%と極めて僅かであるが、塩素濃度は約3700倍であり、塩素成分の約74%が焼成プロセスから分離・抽出されていることがわかる。

表5 セメント製造における都市ごみ焼却灰（ボトムアッシュ・飛灰）
の使用可能量試算値²⁾

	A & B* 共になし	A & B* 共に設置
セメント製造系への塩素 インプット上限値 (ppm)	15	216
ボトムアッシュ中の塩素濃度 [仮定] (%)	1.4	1.4
飛灰中の塩素濃度 [仮定] (%)	15.0	15.0
ボトムアッシュ使用可能量 : a (kg/ton-cement)	0.2	13.3
飛灰使用可能量 : b (kg/ton-cement)	0.1	6.6
合計 (a + b) (kg/ton-cement)	0.3	19.9

* A & B : 塩素バイパスシステム（抽気率 : 5 %）と灰水洗設備

表4は、飛灰の水洗パイロットプラントにおいて、飛灰、濾液、およびキレート処理などを済ませた最終的な排水の化学成分である^{2, 3)}。この表より、最終排水は下水排水許容基準を十分に満足していることがわかる。また、濾液は飛灰の4.5質量倍であることを考えると、飛灰中の塩素の大部分は濾液側に移動していることもわかる。

表5は、セメント製造プロセスにおいて、塩素バイパスシステムおよび飛灰水洗プロセスが両方とも無い場合と、両方とも有る場合について、都市ごみ焼却場で発生するボトムアッシュおよび飛灰の現実的な使用可能量に関する試算例を示す²⁾。この試算では、セメント製造プロセス中において揮発性成分によるコーティングトラブルが最も発生しやすい部位の原料中塩素濃度の、安定操業面からの限界は過去の経験から約6,000ppmと設定されている。先に述べたように、塩素バイパスシステムを設置した場合には、この部位の濃度は大幅に減少できるため、原・燃料中の塩素濃度を大きく増すことが可能になる。また、この試算では、ボトムアッシュと飛灰の使用比率を、焼却場での一般的な発生量比率に合わせて、2 : 1に仮定している。さらに本試算では、灰の水洗によって塩素が97 % 除去できることを前提としている。また、水洗および脱水されたケーキからの重金属の持込量と、セメントとしての重金属類含有率限界も考慮されている。

塩素バイパスシステムと灰水洗プロセスの併用によって、両方とも用いない従来のセメント製造に比べて、焼却灰の使用できる量は66倍となることがこの表からわかる。この値は、日本の典型的な規模である日産10,000トンのセメント工場では、ボトムアッシュと飛灰併せて、1日に約200トン使用できることを

意味する。したがって、一つのセメント工場で、その周辺地域で発生する焼却灰のかかなりの部分を処理することができる。さらに、この技術を幾つかのセメント工場に横展開することによって、冒頭に述べた「日本において緊急かつ重大な課題」を即刻解決する効果的な手段になると考えられる。

6. ま と め

捨て場のない有害廃棄物、特に多量の塩素成分と無視できない程度のダイオキシンや重金属を含有する都市ごみ焼却飛灰を、セメントの原料として多量に有効活用するための実用的な技術開発が行われた。以下にその結果を纏める。

- (1) セメント製造プロセスの閉塞トラブルの原因となる塩素成分を、既存のセメント製造プロセス中から、効率よく抽出する「塩素バイパスシステム」が開発された。
- (2) このシステムは、塩素成分を約3700倍に濃縮した固形物として連続的に抽出するものであり、セメント製造プロセスに対して、熱ロスおよび原料ロスを極めて少なくできる実用技術である。既に、日本の幾つかのセメント工場でこの技術が採用されている。
- (3) 可溶性塩化物を多量に含んだ廃棄物を水洗することによって塩素成分を除去し、残った固形物は洗浄しながら固液分離してセメント原料の一部代替とする実用規模技術が開発された。
- (4) この技術では塩素成分や重金属類が水洗水に溶出し、ベルトフィルタの特性を有効に利用した固液分離を行うことにより、塩素成分では約97 % が除去できる。水洗した後の液に対しては、炭酸ガスを多く含むセメントキルン排ガスを作用させることなど

により、その液中に有する重金属類も分離でき、下水排水許容基準を満足できる。また、飛灰中のダイオキシン類はすべてが脱水ケーキ中に残り、これはセメントキルン内で破壊される。

(5) これら二つの技術を併用することにより、日本の

典型的な規模のセメント工場では、一つのセメント工場で1日に約200トンの都市ごみ焼却灰を有効活用できる。したがって、これら二つの技術の併用は日本の緊急かつ重要課題を即刻解決する効果的な手段になると考えられる。

引用文献

- 1) Sutoh, K., H. Harada and N. Ueno: "Concentration is the key", *INTERNATIONAL CEMENT REVIEW*, (6), 36-41 (1999)
- 2) 須藤勘三郎, 原田 宏, 高橋寛昭: "都市ごみ焼却灰のセメント原料化システムの開発", *セラミックス*, **34**, 349-353 (1999)
- 3) 宇智田俊一郎, 伊藤光弘: "焼却灰を原料に用いたセメント製造技術", *日本エネルギー学会誌*, **78**, 733-742 (1999)
- 4) 長野健一: "エコセメントの製造技術と最近の進展について", *粉体と工業*, **32** (5), 65-72 (2000)
- 5) セメント協会編: "セメントの常識", p. 52, セメント協会 (1998)
- 6) 環境庁編: "平成12年度版環境白書", p. 258, ぎょうせい (2000)
- 7) 内田 仁, 上野直樹, 原田 宏, 廣瀬敏章: "高抽気型塩素バイパスシステムの開発", 第56回セメント製造技術シンポジウム報告集, p. 72-79 (1999)
- 8) 上野直樹, 原田 宏, 須藤勘三郎: "塩素バイパスシステムによるセメントキルンの安定化運転と廃棄物の有効活用", *セメント・コンクリート*, (634), 28-35 (1999)
- 9) 伊藤光弘, 廣瀬敏章, 高橋寛昭: "焼却灰のセメント原料化技術", 特願平9-205246
- 10) ダイオキシン問題解決への展望編集委員会編: "ダイオキシン問題解決への展望", p. 6, 工業技術会 (1992)
- 11) 森田昌敏: "ダイオキシン入門", p. 286, 日本環境衛生センター (1994)
- 12) 伊藤光弘, 栄 一雅: "工業的に有効な無機材料の回収方法", 特願平11-202523
- 13) 伊藤光弘: "セメント製造におけるリサイクル資源の活用と環境対策", *金属*, **68**, 778-784 (1998)
- 14) Ito, M.: "Utilization of Wastes in Production of Portland Cement and Associated Environmental Measures", the Second International Conference on Processing Materials for Properties (San Francisco, Nov. 2000)