

セメント分野における環境問題への取組み

中尾 正文*

1. はじめに

わが国のセメント産業は、現在大きな変化を遂げつつある。製品であるセメントを供給するだけでなく、大規模かつ連続式の高温焼成炉（ロータリーキルン）の特徴をいかし、他産業などから発生する廃棄物・副産物（以下、廃棄物等と表記）の安全かつ合理的な受け皿(処理・処分ではなくセメント原料・熱エネルギー源としての活用)という新たな役割を果たしている。

わが国のセメント産業がこれからの循環型社会の形成に大きく貢献するものと期待されているところである。

本稿では、セメント産業における環境問題への取組みや成果の概要を紹介する。

2. セメント産業における地球温暖化対策

2005年2月、京都議定書が発効し、わが国の温室効果ガスの6%削減が義務化された。4月末には京都議定書目標達成計画が閣議決定され、さまざまな主体において削減に向けた取組みが本格化しているところである。

セメント産業は、1450℃に及ぶ高温焼成工程を有しているため、かねてより省エネルギーに向けた取組みを行っており、図-1に示すように世界中でもっとも低いエネルギーでセメントを作っている。

また、日本経団連における環境自主行動計画に参画し、1996年12月に「セメント産業の環境保全に関する自主的行動計画」を策定し、2010年度におけるセメント製造用エネルギー原単位（セメント製造用+自家発電用+購入電力）を1990年度比で3%低減させることを目標とした。

この自主行動計画は、毎年フォローアップを行い、経団連に設置された第三者評価委員会（委員長・帝京大学教授山口光恒氏）の評価を受けている。セメント産業の2003年度のフォローアップ結果では、図-2に示すように1990年度比4.1%減を達成している。

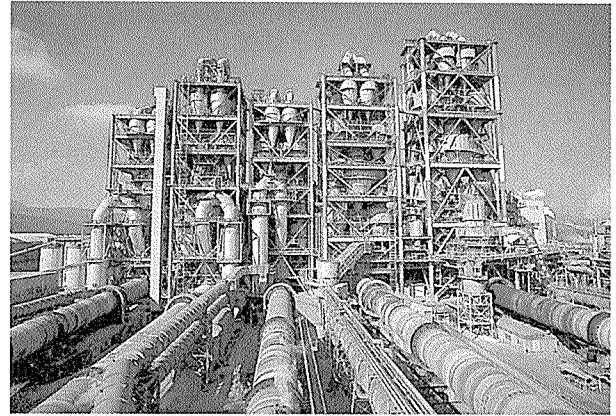


写真-1 セメント工場の概観 (三菱マテリアル(株)提供)

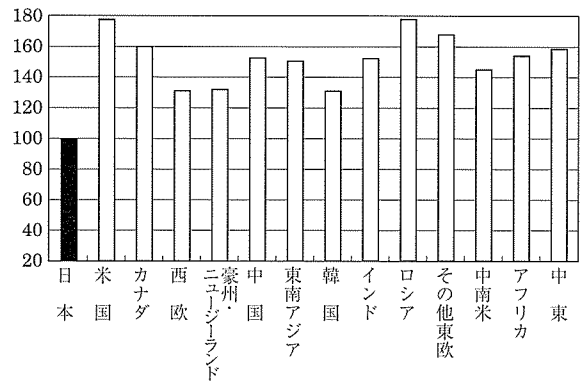


図-1 クリンカt当たりエネルギー消費量 国際比較 (2000年) 1) (日本=100)

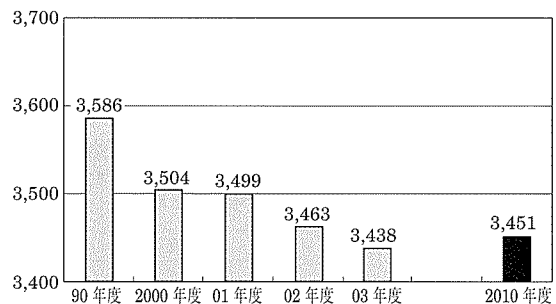
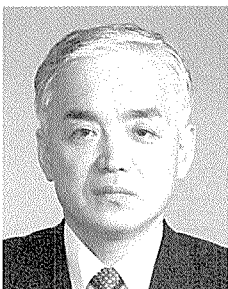


図-2 セメント製造用エネルギー原単位 (MJ/t-セメント)



* Masafumi NAKAO

(社)セメント協会 生産・環境委員会 幹事長 (住友大阪セメント(株))

3. セメントの製造工程における熱の有効利用

セメントの製造工程は、大きく原料工程、焼成工程、仕上げ工程の3つに分けられる。

最初の原料工程は、成分が一定の粉末原料を作る工程で

ある。従来は、石灰石、粘土、珪石、鉄原料等の天然原料で賄ってきたが、現在では多種多様な廃棄物・副産物を天然原料の一部（代替品）として使用している。この工程では、これらの原料を乾燥・粉砕、混合して所定の化学成分とした原料粉末を作っている。なお、乾燥の熱源には焼成工程の排熱が使用される。

焼成工程は、原料を最高 1 450℃まで加温・焼成して所定の化合物とする工程である。この工程において粉末原料の化学成分は温度変化に伴う化学反応により、新たな化合物である「クリンカ」という中間製品となる。

焼成工程はセメント工場の心臓部であり、4～5段のサイクロンから構成されるプレヒータ（予熱機）、ロータリーキルン（回転窯）、クリンカクーラ（冷却機）で構成される。

プレヒータは高さ 50～90メートルに及ぶ巨大なタワーで、ロータリーキルンの排ガスにより粉末原料を 900℃程度まで予熱する装置である。

ロータリーキルンは直径約 5メートル、長さが約 90メートルの 3～4度傾斜した円筒形の設備で、1分間に 2～4回の速度で回転する。プレヒータで予熱された原料はロータリーキルンに導入され、回転とともに混合されながら徐々に移動し最高温度に到達する。最高温度となったクリンカは、クリンカクーラに入り、空気により一気に 100℃程度まで冷却される。また、このクリンカクーラ内でクリンカを冷却した空気は燃焼用空気として利用される。

最後の仕上げ工程はクリンカを最終製品の「セメント」にする工程である。クリンカにセメントの硬化速度を調節する機能を持つ石膏を少量加え、粉砕機（ボールミル）で微粉末になるまで粉砕する。

4. 廃棄物等の活用原理

セメントは、主に酸化カルシウム、二酸化珪素、酸化アルミニウム、酸化第二鉄の 4つの成分からなっており（表-1）、これらの成分は、高温で焼成されたクリンカ中で珪酸カルシウム（エーライト（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）、ビーライト（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）と称する二つのタイプがある）、アルミネート相（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）およびフェライト相（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）という 4つの形態の化合物を作る。これらの化合物は水を加えることにより「水和反応」を起こし、

出来上がった水和生成物が骨材（砂・砂利）同士を強固に結び付け、その結果、安定した固体としての「コンクリート」を形成することになる。

セメントの成分として必要なこれらの化合物の成分は、石灰石（酸化カルシウム CaO ）、粘土（二酸化珪素 SiO_2 、酸化アルミニウム Al_2O_3 ）、珪石（二酸化珪素 SiO_2 ）、鉄原料（酸化第二鉄 Fe_2O_3 ）から供給されるが、廃棄物等の多くもこれらの成分で構成されているため天然原料との代替が可能である。

したがって、天然資源の代替として廃棄物等を使用する場合にも、各種原料からの配合を調整することで、最終的に所要の成分構成となるように品質管理されている。

他方、焼成工程において使用される可燃性廃棄物等は高温域に投入されるため、完全燃焼し、セメント製造用熱エネルギーとして回収することができる。

可燃性廃棄物等の安全な処理だけでなく、高度なサーマルリサイクルにより、単純焼却された場合に発生したであろう温室効果ガスの削減にも貢献しているといえる。

また、燃焼残渣（灰）もセメント成分と同様の CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 で構成されているため、全て原料として取り込まれる。すなわち、セメントにおけるリサイクルでは二次的な廃棄物は発生せず、サーマルリサイクルとマテリアルリサイクルが同時に行なわれており、これも大きな特徴の一つといえる。

多種多様な廃棄物等を活用していくには多くの技術開発が必要であり、これらの開発の継続発展を前提に、今日の「循環型社会における廃棄物リサイクルの一翼を担う産業」としての位置付けが期待されている。

5. 廃棄物等の活用実績

表-2に、ここ数年のセメント産業における廃棄物等活用量の推移を示す。2004年度で合計 2 800万トンを超える廃棄物等を活用しており、セメント生産 1トン当たり 401kgに相当する。

2001年7月に経済産業省がまとめた「循環型社会の構築に向けたセメント産業の役割を検討する会報告書」では、「2010年度におけるセメント産業全体での当面の目安としてセメント 1トン当たりの廃棄物等の利用量 400kgを努力

表-1 天然原料および主な廃棄物・副産物の化学組成

| | セメント原料 | 酸化カルシウム CaO | 二酸化珪素 SiO_2 | 酸化アルミニウム Al_2O_3 | 酸化第二鉄 Fe_2O_3 |
|------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 天然原料 | 石灰石 | 47～55% | ～4% | ～2% | ～2% |
| | 粘土 | ～5% | 45～80% | 10～30% | 3～10% |
| | 珪石 | ～2% | 70～95% | 2～10% | ～5% |
| | 鉄原料 | | | | 40～90% |
| 廃棄物 | 石炭灰 | 5～20% | 40～65% | 10～30% | 3～10% |
| | 焼却灰 | 20～30% | 20～30% | 10～20% | ～10% |
| | 下水汚泥 | 5～30% | 20～50% | 20～50% | 5～15% |
| | 鋳物砂 | ～5% | 50～80% | 5～15% | 5～15% |
| | 廃タイヤ | | | ～10% | 5～20% |
| 副産物 | 高炉スラグ | 30～60% | 20～45% | 10～20% | ～5% |
| 参考) | 普通ポルトランドセメント | 63～65% | 20～23% | 3.8～5.8% | 2.5～3.6% |

表 - 2 天然原料および主な廃棄物・副産物の化学組成

| 種 類 | 主な用途 | 2000 年度 | 2001 年度 | 2002 年度 | 2003 年度 | 2004 年度 |
|----------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 高炉スラグ | 原料, 混合材 | 12 162 | 11 915 | 10 474 | 10 173 | 9 231 |
| 石炭灰 | 原料, 混合材 | 5 145 | 5 822 | 6 320 | 6 429 | 6 937 |
| 汚泥, スラッジ | 原料 | 1 906 | 2 235 | 2 286 | 2 413 | 2 649 |
| 副産石こう | 原料 (添加材) | 2 643 | 2 568 | 2 556 | 2 530 | 2 572 |
| 建設発生土 | 原料 | — | — | 269 | 629 | 1 692 |
| 非鉄鋼滓等 | 原料 | 1 500 | 1 236 | 1 039 | 1 143 | 1 305 |
| 燃えがら (石炭灰は除く) ばいじん, ダスト | 原料, 熱エネルギー | 734 | 943 | 874 | 953 | 1 110 |
| 鋳物砂 | 原料 | 477 | 492 | 507 | 565 | 607 |
| 製鋼スラグ | 原料 | 795 | 935 | 803 | 577 | 465 |
| 木くず | 原料, 熱エネルギー | 2 | 20 | 149 | 271 | 305 |
| ボタ | 原料, 熱エネルギー | 675 | 574 | 522 | 390 | 297 |
| 廃プラスチック | 熱エネルギー | 102 | 171 | 211 | 255 | 283 |
| 再生油 | 熱エネルギー | 239 | 204 | 252 | 238 | 236 |
| 廃タイヤ | 原料, 熱エネルギー | 323 | 284 | 253 | 230 | 221 |
| 廃油 | 熱エネルギー | 120 | 149 | 100 | 173 | 214 |
| 廃白土 | 原料, 熱エネルギー | 106 | 82 | 97 | 97 | 116 |
| 肉骨粉 | 原料, 熱エネルギー | 0 | 2 | 91 | 122 | 90 |
| その他 | — | 431 | 428 | 435 | 378 | 452 |
| 合計 | — | 27 359 | 28 061 | 27 238 | 27 564 | 28 780 |
| セメント 1t 当たりの使用量 (kg/t) | | 332 | 355 | 361 | 375 | 401 |

注) 建設発生土は 2001 年度までは「その他」に含まれている。

目標として設定すべき」とされていたが、各社の努力により、この目標を早期に達成することができた。

表 - 2 の内訳を見ると、昨今では廃プラスチック、木くず等の熱エネルギー代替廃棄物や原料代替としての建設発生土ならびに下水汚泥 (汚泥, スラッジに含む)、都市ごみ焼却灰 (燃えがらに含む) 等生活系廃棄物の増加が顕著となっている。

また、その処分先が問題となっていた肉骨粉についても、一般の焼却施設を含む全国処理量のおよそ半分を引き受けている。

6. 先端事例としての取組み

以上述べてきたように、すでに国内で流通しているセメントはすべてが「リサイクル製品」と呼んでもよいほどに廃棄物等を活用してきている。これらの流れの中で、先端的な事例を以下に紹介する。

(1) 遊休設備を用いた都市ごみのセメント原料・熱エネルギーとしての活用

埼玉県日高市では、同市の発生ごみを市内のセメント工場で処理している。このシステムは、AK (Applied Kiln) システムと呼ばれ、セメント製造の遊休設備 (ロータリーキルン (写真 - 2)) を改造した「資源化キルン」により都市ごみを好気性発酵させた後、セメントの原料、熱エネルギーとして活用するシステムである。清掃工場の更新時期を迎え、都市ごみの処理方法について検討していた日高市と、セメント需要が減少し、セメント製造設備の一部が遊休化していたセメント会社との間で、これらの遊休設備を活用した都市ごみ処理について検討が行われた結果、この AK システムが生まれた。

AK システムでは、ごみ収集車で回収した都市ごみを取

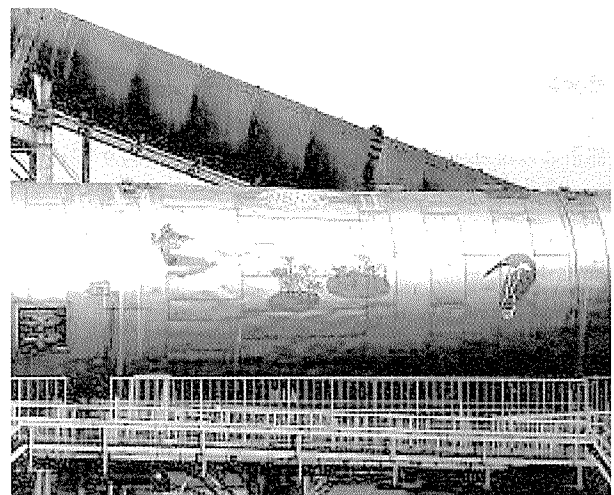


写真 - 2 資源化キルン

集袋のまま「資源化キルン」へ投入する。3 日ほどかけて「資源化キルン」を通過する間に収集袋が破れ、中味のごみの好気発酵が進んで、悪臭成分が分解されるとともに土壌に近い性状の「資源化物」となる。「資源化物」は、ハンドリング性が良く、フルイや破碎機による異物除去やサイズ調整も容易であり、隣接するロータリーキルンでセメント原料として活用することができる。すなわち、「資源化物」中の可燃分は燃焼してセメント焼成エネルギー源となり、その灰分や不燃物もセメント原料として有効利用され、二次廃棄物は発生しない。

本システムは 2002 年 11 月から営業運転を開始し、日高市のごみの全量 (年間約 1 万 5 千トン) を受け入れ、セメントの原料、熱エネルギーとして活用している。

(2) 新たなセメント「エコセメント」

経済産業省は、循環型経済社会構築の観点からリサイクルと廃棄物処理の統合的推進を目指し、それらを促進するための環境整備として環境・資源循環に関する JIS、所謂環境 JIS を推進してきた。環境 JIS の第一弾として、2002 年 7 月 20 日にエコセメントの JIS 規格 (JIS R 5214) が制定された。

JIS 規格の中でエコセメントは、「都市部などで発生する廃棄物のうち主たる廃棄物である都市ごみを焼却した際に発生する灰を主とし、必要に応じて下水汚泥などの廃棄物を従としてエコセメントクリンカの主原料に用い、製品 1 トンにつきこれらの廃棄物を乾燥ベースで 500 kg 以上使用してつくられるセメント」と定義されている。原料に廃棄物の使用が明確にうたわれているのが従来のポルトランドセメント (国内でもっとも汎用的に流通しているセメント) の JIS と大きく異なる点である。

都市ごみ焼却灰に含まれる成分に着目し、これをセメントとしてリサイクルするべく誕生したのがエコセメントであるが、その背景には、日本国内の廃棄物を取り巻く厳しい状況の中で、最終処分場の延命やダイオキシン類対策にも寄与するセメント資源化への期待が自治体の間で高まったことがある。

1994 年の実証研究のスタートから 7 年を経て、2001 年 4 月に世界で初めてのエコセメント製造施設である市原エコセメント (写真 - 3) が千葉県市原市で稼働を始めた。このプラントは、千葉県人口の 1/4 に相当する約 150 万人分の都市ごみ焼却灰と産業廃棄物を合わせて年間約 9 万 t 受入

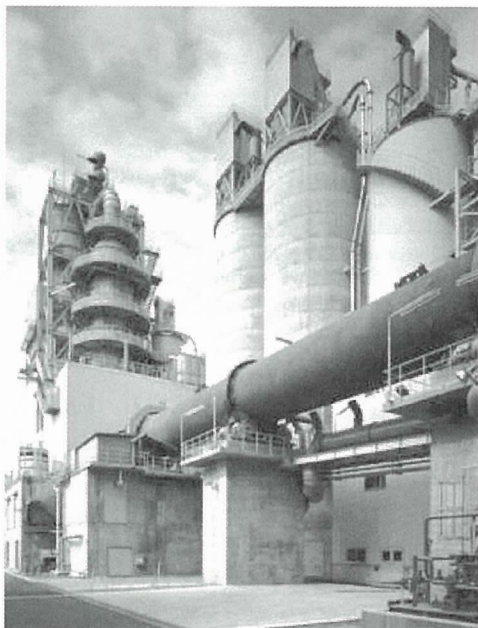


写真 - 3 市原エコセメント工場概観

れ、年間約 11 万 t のエコセメントを製造する能力を有する。稼働開始から 4 年以上を経過する間に、エコセメントの利用技術や規格が整備され、広く使用が可能な材料として社会的な認知も進んできた。

市原エコセメントに続く 2 番目のエコセメント施設としては、東京都三多摩地区 25 市 1 町が構成する東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合 (以下「三多摩処分組合」) が、日の出町二ツ塚最終処分場に工場建設を進めており、2006 年度に稼働開始予定である (図 - 3)。この施設は三多摩処分組合から、「東京たまエコセメント株式会社」(太平洋セメントと荏原製作所の共同出資) がその運営を委託されるもので、20 年間にわたって焼却灰など年間約 9 万 t から年間約 13 万 t のエコセメントを製造し、コンクリート工事やコンクリート製品工場に供給する計画となっている。

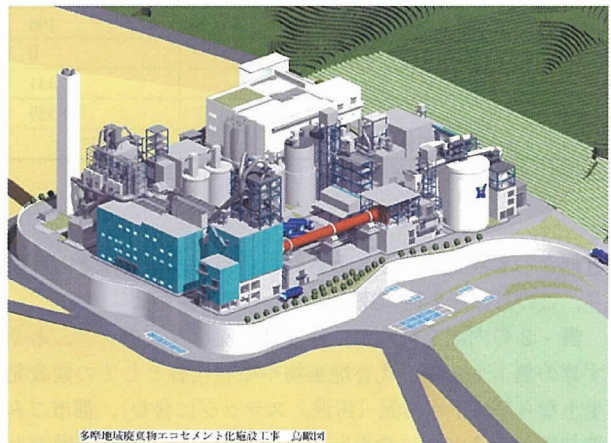


図 - 3 多摩地域廃棄物エコセメント化施設完成予想図

7. おわりに

長引く需要の低迷により、セメント生産量は減少の一途をたどっており、2004 年度にはピーク時より 28% も落ち込み、業界を取り巻く環境は一段と厳しさを増している。

このような状況の下で、業界では廃棄物等の更なる活用推進を図るため、これまで以上に工場インフラを有効に活用すべく、さまざまな技術開発に挑戦している。

また、他産業との連携はもとより、地域ごとにセメント産業の特徴を最大限利用できるよう努力を続けている。

今後とも関係各方面のご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 『Toward a Sustainable Cement Industry Substudy 8 : CLIMATE CHANGE (March 2002)』 (Battelle)

【2005 年 9 月 6 日受付】