

## 学位論文題名

セメント製造および廃棄物のセメント原燃料利用の  
LCI分析に関する研究

## 学位論文内容の要旨

1990年代に入って地球・地域規模の様々な環境問題が顕在化し、社会の環境に対する意識は急速に高まっている。特に地球温暖化に対しては国際的に取り組むべき問題として位置づけられ、民生・産業それぞれにおいて削減が求められている。一方、地球温暖化とともに国内で注目されているのが廃棄物の問題である。特に産業廃棄物の発生量は年間4億トンにもおよび、一般廃棄物の5千万tと比べて非常に多い。また、最終処分場への埋立量も一般廃棄物の1000万tと比較して約4倍に達しており、関東や近畿の最終処分場の残余容量は2年足らずと危機的な状況にある。したがって、産業界にはCO<sub>2</sub>削減に加えて廃棄物のリサイクル促進が求められている。セメント産業では、混合セメントの製造や他産業から発生した廃棄物を原燃料として積極的に利用することで上記の問題に取り組んでいるものの、定量的な効果は必ずしも明確にされていない。本研究は、セメントの種類毎の環境負荷を明らかにするとともに、CO<sub>2</sub>削減や廃棄物のリサイクル促進に有効な新たなセメントの開発ならびに廃棄物をセメント原燃料として利用した際のCO<sub>2</sub>排出量に対する効果を明らかにしたものである。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的を明らかにし、既往の研究動向ならびに本研究の構成について概説した。

第2章では、セメント製造の一般的なインベントリ作成を行い、それをセメントの種類毎に明らかにした。対象としたセメントは生産量の95%以上を占めるポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種とした。その結果、セメント製造時の環境負荷排出量のほとんどはセメントの中間製品であるクリンカ焼成時に発生し、特にCO<sub>2</sub>排出量の約60%は、クリンカ原料の石灰石の脱炭酸に起因していることを明らかにした。したがって、高炉スラグやフライアッシュによりクリンカを代替した混合セメントの環境負荷は、ポルトランドセメントと比較して低いことが判明した。一方、廃棄物の使用量はセメント1tあたりのクリンカ使用量で支配され、その使用量が最も多いポルトランドセメントが有効なことを明らかにした。また、セメントがコンクリートの一材料として使われるからコンクリート構造物の建設(施工)、解体、廃棄・リサイクルに関わる各プロセスおよび建設機械類等稼動に伴うインベントリを調査し、セメント・コンクリートのLCIを行

うことで、SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 等大気汚染物質排出量は、セメント等材料工程以外の影響が大きいことを明らかにした。

第3章では、新たなセメントとして石灰石フィラーセメントの開発に関する検討を行った。また、第2章で得られた結果を参考に、開発した石灰石フィラーセメントのインベントリを作成した。混合材として使用する石灰石の品質や粉末度、粉砕方法等を最適化することで、ポルトランドセメントと比較して製造時の環境負荷を抑制しながら廃棄物使用量を確保した石灰石フィラーセメントを提供した。

第4章では、セメント製造時の廃棄物・副産物利用が環境負荷へ及ぼす影響を明らかにした。ポルトランドセメントの原燃料として、従来の廃棄物・副産物利用による影響を利用しない場合と比較し、CO<sub>2</sub> 排出量をセメント 1t あたり 56kg 削減していることを明らかにした。次に、都市ごみまたはその焼却残渣を原料・燃料代替として利用する際の前処理技術として開発された「AKシステム」「灰水洗技術」の環境負荷を検討した。さらに、都市ごみ焼却残渣を主原料として開発した「エコセメント」の CO<sub>2</sub> 排出量についても定量化し、いずれも既存の焼却処理および埋立処分と比較して排出削減に有効なことを示した。

第5章では、廃棄物処理法で区分されている種類毎に化学成分を調査し、各廃棄物を最大限セメント原燃料として利用した際の CO<sub>2</sub> 排出量への影響を、第2, 4章の結果を活用しながら検討した。また、廃棄物発生量やセメントの品質、重金属含有量等を考慮しながら現実的な廃棄物使用量を明らかにし、利用を妨げる制約を明確にした。その結果、セメント製造燃料を代替する可燃性廃棄物の利用は、いずれも既存の焼却処理や埋立処分後の分解が回避されるため CO<sub>2</sub> 削減に有効であることを明らかにした。原料を代替する廃棄物は、塩素や水分が少なく、CaO 含有量が多いものが効果的なことを示した。こうした廃棄物種類ごとの特徴を把握し、それらを組合わせて使用すれば、効率的に CO<sub>2</sub> 排出量や廃棄物埋立処分量を削減出来ることを明らかにした。

以上のように、本研究は、セメントの種類毎の環境負荷や負荷削減と廃棄物リサイクルを両立する新たなセメントの提供、さらに一般廃棄物のセメント資源化技術や各種廃棄物をセメント原燃料として利用した際の CO<sub>2</sub> 排出量に及ぼす影響を主に検討したものである。今後の温暖化抑制および資源循環型社会形成に向けて、その目標を達成する様々な方策が検討されている。本研究の成果は、具体的な CO<sub>2</sub> 削減計画や廃棄物処理計画を立案する際の情報として活用でき、またその実現に貢献できるものである。

# 学位論文審査の要旨

主査 助教授 松藤敏彦  
副査 教授 恒川昌美  
副査 教授 名和豊春  
副査 助教授 廣吉直樹

学位論文題名

## セメント製造および廃棄物のセメント原燃料利用の LCI分析に関する研究

1990年代に入って地球・地域規模の様々な環境問題が顕在化し、環境に対する意識は急速に高まっている。特に地球温暖化は国際的に取り組むべき問題と位置づけられ、民生・産業それぞれにおいて削減が求められている。一方、地球温暖化とともに国内で注目されているのが廃棄物の問題である。特に産業廃棄物の発生量は年間4億トンと一般廃棄物の8倍にあたる。特に、最終処分場への埋立量4000万トンは一般廃棄物の約4倍に達しており、関東や近畿の最終処分場の残余年数は2年あまりと危機的な状況にある。したがって、産業界にはCO<sub>2</sub>削減に加えて廃棄物のリサイクル促進が求められている。

セメント産業は、混合セメントの混合材として、あるいは原燃料として他産業から発生した廃棄物の積極的な利用をはかることで、上記の問題に取り組んできた。しかし、その効果の定量的評価は、十分になされていなかった。本研究は、ライフサイクルアセスメント(LCA)の手法を用いて従来のセメントの種類ごとの環境負荷を明らかにし、CO<sub>2</sub>削減や廃棄物利用の促進に有効な新たなセメントの開発、および廃棄物を積極的にセメント原燃料として利用した際の効果を明らかにしたものである。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的について述べるとともに、既往の研究動向ならびに本研究の構成について概説した。

第2章では、生産量の95%以上を占めるポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種セメント製造の、インベントリ作成を行った。セメント製造時の環境負荷排出量のほとんどはセメントの中間製品であるクリンカ焼成時に発生し、特にCO<sub>2</sub>排出量の約60%は、クリンカ原料の石灰石の脱炭酸に起因していることを明らかにした。したがって、高炉スラグやフライアッシュによりクリンカを代替した混合セメントの環境負荷は、ポルトランドセメントと比較して低い。逆に、廃棄物の使用量はセメント1トンあたりのクリンカ使用量に依存するため、混合セメントは小さくなる。また、コンクリート構造物の建設(施工)、解体、廃棄・リサイクルの各プロセス、および建設機械類等稼動に伴うインベントリを調査し、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等大気汚染物質排出量は、セメント等材料工程

以外の寄与が大きいことを明らかにした。

第2章において混合材によるクリンカ代替が有効であることが明らかとなったことから、第3章では国内産出量が豊富な石灰石を混合材として使用する石灰石フィラーセメントに関する検討を行った。石灰石の品質や粉末度、粉碎方法等を最適化することで、ポルトランドセメントと比較して製造時の環境負荷を低減し、廃棄物使用量もフライアッシュセメントB種と同等である石灰石フィラーセメントが製造できることを示した。また、第2章で得られた結果を参考に、開発した石灰石フィラーセメントのインベントリを作成した。

第4章では、セメント製造時の廃棄物・副産物利用による環境負荷低減効果を明らかにした。まず、全く廃棄物を使用しないセメント製造と比べ、従来のポルトランドセメントが廃棄物・副産物利用によってCO<sub>2</sub>排出量をセメント1トンあたり56kgの削減となることを明らかにした。次に、遊休キルンを用いて都市ごみ中の有機物を安定化し原燃料化するAKシステム、都市ごみ焼却残渣を水洗し原料代替とする灰水洗技術、および都市ごみ焼却残渣をセメントの主原料とするエコセメントのCO<sub>2</sub>排出量を評価した。いずれも既存の焼却処理および埋立処分と比較して排出削減に有効なことを示した。

第5章では、さらに廃棄物の積極的利用を進めるための検討を行った。まずセメント品質を確保するための成分調整、重金属等含有量の制約条件、および使用可能な廃棄物量を考慮し、一種類の廃棄物のみ利用する場合の効果を計算した。木くずなどの可燃性廃棄物は燃料を代替し、CO<sub>2</sub>削減効果は大きいですが、これらはすでに他の有効利用方法があり、埋立量削減効果は小さい。一方、セメント原料を代替するばいじん、汚泥などは、CO<sub>2</sub>削減効果は燃料代替廃棄物に較べて小さいが、マテリアルリサイクルとなり、埋立量も削減される。この結果をもとに、現状のセメント製造に複数の廃棄物を追加利用する場合の効果を検討し、がれき類とばいじんを最大限使用することで、環境省が示しているセメント製造のCO<sub>2</sub>削減、廃棄物再資源化量の2010年度目標値とともに達成できることを明らかにした。

これを要するに、著者は、従来のセメントおよび、廃棄物を積極的に利用する各種セメント製造技術についてインベントリ分析を行い、廃棄物埋立量、CO<sub>2</sub>排出量の削減における効果を定量的に明らかにした。さらに、すべての廃棄物を対象としてその利用可能性と効果も示し、セメント製造技術の地球温暖化対策、廃棄物利用の促進に対し重要な知見を与えており、廃棄物工学およびセメント工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。