

◇論文◇

多様な環境領域を考慮したセメント製造の 環境負荷低減技術の評価

Assessment of Environmental Technologies for Cement Production Considering Multiple Environmental Categories

桐野 裕介*, 内田 俊一郎**,
新見 龍男***, 河合 研至****

KIRINO, Yusuke*; UCHIDA, Shunichiro**;
SHINMI, Tatsuo***; KAWAI, Kenji****

要旨

セメント製造における環境負荷は、クリンカ焼成時のCO₂排出量によって評価されることが多い。一方、地球温暖化のような特定の環境領域のみを考慮すると、他の環境領域からの環境負荷が増加し、その結果、意図せずに全体の環境負荷が増加する可能性が考えられる。本研究では、LIME3を用いて、複数の環境領域と地域の環境条件を考慮した統合化指標により、セメント生産における複数の環境負荷低減技術の評価を行った。その結果、世界全体の典型的な環境条件下では、「代替エネルギー比率の増加」が最も効果的な環境技術であることが判明した。一方、環境影響が相対的に大きい国を想定した評価では、「代替原料比率の増加」の効果が最も大きく、埋立処分場の社会的価値が高い国では廃棄物の埋立を回避する技術を優先的に適用すべきことが示唆された。以上より、CO₂排出量は環境負荷全体の指標としては必ずしも適切ではなく、トレードオフを生じることが明らかになった。

キーワード: ライフサイクルアセスメント, LIME, CO₂, 廃棄物・副産物, 代替原料,
代替エネルギー, 大気汚染

*中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント化学チーム

Cement Chemistry Team, Cement & Concrete Research Department

**中央研究所 研究開発推進部 部長

General Manager, Research & Development Promotion Department

***株式会社トクヤマ

TOKUYAMA CORPORATION

****国立大学法人広島大学

HIROSHIMA UNIVERSITY

ABSTRACT

The environmental impact of cement production is often assessed in terms of CO₂ emissions during clinker burning. If only a specific environmental impact category, such as global warming, is considered, the environmental impact from other categories might increase, and then the overall environmental impact might increase unintentionally. In this study, LIME3, Life-Cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling 3, was used to assess various environmental technologies for cement production based on an integrated indicator that considers multiple environmental impact categories and local environmental conditions. The results showed that "increased use of alternative fuels" was the most effective environmental technology under the typical environmental conditions. On the other hand, the effect of "increased use of alternative raw materials" was the largest in the evaluation assuming countries with larger environmental impact factors, suggesting that technologies to avoid landfill of wastes should be applied preferentially in the countries with high social value of landfill sites. Therefore, it was revealed that CO₂ emissions are not a good indicator of overall environmental impact and might generate trade-offs in the countries with larger environmental impact factors.

Keywords : *Life cycle assessment, LIME, Carbon dioxide, Waste and by-products, Alternative raw materials, Alternative fuels, Air pollution*

1. はじめに

世界全体の持続可能な発展に向け、セメント産業においても環境負荷低減を含むさまざまな取り組みが実施されている。セメント産業の環境負荷低減方策では、多様な環境側面が考慮されているものの、定量的な基準としてはCO₂排出量が用いられる場合が多い^{1) 2)}。一方、地球温暖化のような特定の環境領域のみを考慮して評価や開発が行われた場合、考慮していない別の側面による環境負荷が増大し、総合的な環境負荷が意図せず増加してしまう可能性が考えられる。

セメント産業における特定の環境負荷低減技術を詳細に評価した例としては、混合材や再生骨材の活用³⁾、コンクリート配合の最適化⁴⁾等があり、環境負荷物質の排出量あるいは特性化によって評価が行われる場合が多い。一方、複数の環境負荷低減技術を統合化（重み付け）によって、シナジーやトレードオフまで含めて総合的に評価した例は少ない。また、環境影響評価では、国や地域の環境条件によって異なる結果が得られるものの⁵⁾、環境条件の違いを考慮して評価した例はない。そのため、本研究では、

セメント産業における代表的な環境負荷低減技術を、複数の環境条件下にて評価することによって、同技術の効果を総合的な視点から示すこととした。

2. 評価方法

2.1 評価に用いたデータ

世界で生産される平均的なセメントを基準とし、同セメントの製造方法を仮想的に改善させた場合の環境影響低減効果を評価した。評価の基準（機能単位）はセメント1tとし、評価範囲（システム境界）は天然原料の採掘からセメントの製造工程までを対象とした。また、クリンカ製造時に代替エネルギーあるいは代替原料として廃棄物を活用したことによるCO₂排出および廃棄物埋立の削減貢献効果を併せて評価した（Fig. 1）。なお、一般的に有価で取り扱われるセメント用混合材は、副産物（共製品）として取り扱い、埋立回避による削減貢献は考慮しなかった。

評価の基準となる平均的なセメントのインベントリデータとして、Global Cement and Concrete Association（以下、GCCA）の2016年の値を主に用い

た (Table 1). また, GCCAにて公開されていないデータに関しては, 2016年当時の WBCSD CSIのコアメンバーが Sustainability reportで公開している値を参考に推定した. セメントの代表的な複数の環境負荷低減技術を評価し, これら低減技術を最も取り入れている国もしくは企業の値と平均的なセメントのデータを比較することによって, 同技術の環境影響低減効果を得た.

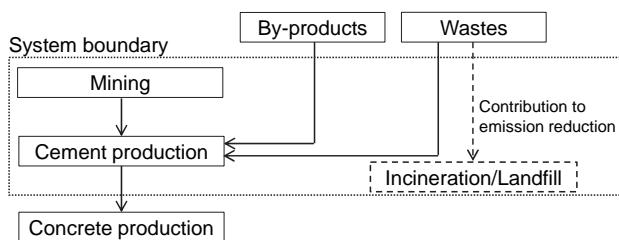


Fig. 1 System boundary in this study (dotted line)
 (本研究におけるシステム境界 (点線))

2.2 環境影響評価方法

世界各国の環境条件を考慮した環境影響評価手法であるLIME⁵⁾を用いて, セメントの影響評価を行った. 環境影響評価にあたっては, 環境負荷を負の値, 環境負荷の削減貢献 (環境貢献) を正の値として算出した. 統合化は, 式(1)に基づき, G20の重みづけを用いた経済価値評価を行った (単位はUS\$). 統合化係数は, 複数の国の環境条件を考慮するため, 世界全体の中央値 (50パーセンタイル値) および最小値から数えて75%に位置する値 (75パーセンタイル値) を用いて, それぞれ評価を行った. 75パーセンタイル値は同一の環境負荷物質を排出しても比較的環境への影響が大きい国に対応し, 本研究で用いた主要な統合化係数が75パーセンタイル値以上となる国は, ヨーロッパや中東の一部が該当する.

$$\begin{aligned} &\text{Environmental impact} \\ &= \sum \sum (Inv(X) \times IF\ Impact(X)) \end{aligned} \quad (1)$$

Table 1 Inventory data of clinker and cement
 (クリンカおよびセメントのインベントリデータ)

			Average method	Environmental impact reduction method					
				Improved thermal efficiency	Increased use of alternative fuels	Reduction of air pollutants	Increased use of alternative raw materials	Increased use of natural product as mineral admixture	Increased use of by-product as mineral admixture
Clinker	Coal	kg/t	114	100	46	114	114	114	114
	CO ₂	kg/t	810	776	646	810	810	810	810
	NO _x	g/t	1446	1446	1446	941	1446	1446	1446
	SO _x	g/t	304	304	304	9	304	304	304
	Particulate matter	g/t	63	63	63	34	63	63	63
	Natural raw materials	kg/t	1478	1478	1478	1478	1260	1478	1478
	Waste use	kg/t	55	55	55	55	273	55	55
Cement	Natural product as mineral admixture	kg/t	140	140	140	140	140	310	0
	By-product as mineral admixture	kg/t	88	88	88	88	88	0	310

ここに, $Inv(X)$ はインベントリ項目 X の排出量, $IF^{Impact}(X)$ はインベントリ項目 X の影響領域 $Impact$ に関する統合化係数を表す。

3. 評価結果

3.1 典型的な環境条件における環境負荷低減技術の評価

平均的な方法で製造されたセメントおよび環境影響を低減した方法で製造されたセメントを, LIME3 の中央値を用いて評価した結果を Fig. 2 に示す。平均的な方法で製造されたセメントでは, 地球温暖化による環境負荷が最も大きく, 次いで, 資源消費の負荷が大きく, 大気汚染の負荷は最も小さかった。また, 廃棄物の活用による環境貢献に関しては, 大気汚染による影響と同程度であった。資源消費では, 石炭の消費による寄与が大きく, 石灰石の寄与は小さかった。これは, 使用量の観点からは石灰石の方が多いものの, 資源価値の観点からは石炭の方が高く, 後者の影響が大きく寄与したためである。また, 大気汚染では, 相対的に最も排出量の多い NO_x の寄与が大きかった。

各種環境負荷低減技術において、「代替エネルギー比率の増加」は最も大きい結果が得られた。これは, 代替エネルギーの活用を最も行っているドイツの代

替エネルギー比率(66%)と世界全体の平均値(17%)の差が大きいことが原因である。なお, 同技術では, 化石資源の消費低減効果と CO_2 排出量の削減効果の二種の効果が得られ, 両者の寄与は同程度であった。

「代替原料比率の増加」は, 次いで改善効果が大きいことが判明した。代替原料の活用に関しても, 平均値(3.6%)と最も行っている日本の値(17.8%)の差が大きい。同技術は, 資源消費の低減及び廃棄物の埋立回避による二種の効果が得られるものの, その寄与は後者が大きかった。「混合材比率の増加」は, 三番目に大きい改善効果が得られた。同技術では, 地球温暖化, 資源消費, 大気汚染の低減効果が得られるものの, 混合材の活用が最も進んでいるインドの混合材比率(31%)と世界全体の平均値(23%)の差が小さく, 改善効果はそれほど大きく得られなかった。混合材の種類による評価結果の差は小さく, 天然物・副産物のどちらを用いた場合でもほぼ同一の値であった。これは, 天然混合材の資源価値が相対的に大きくなないことから, 天然資源消費による環境影響が小さいことによる。また, 「混合材比率の増加」ではクリンカ原料の廃棄物代替による環境貢献が小さくなるトレードオフ効果も確認された。「熱エネルギー効率の改善」と「大気汚染物質の低減」による改善効果は相対的に大きくなかった。

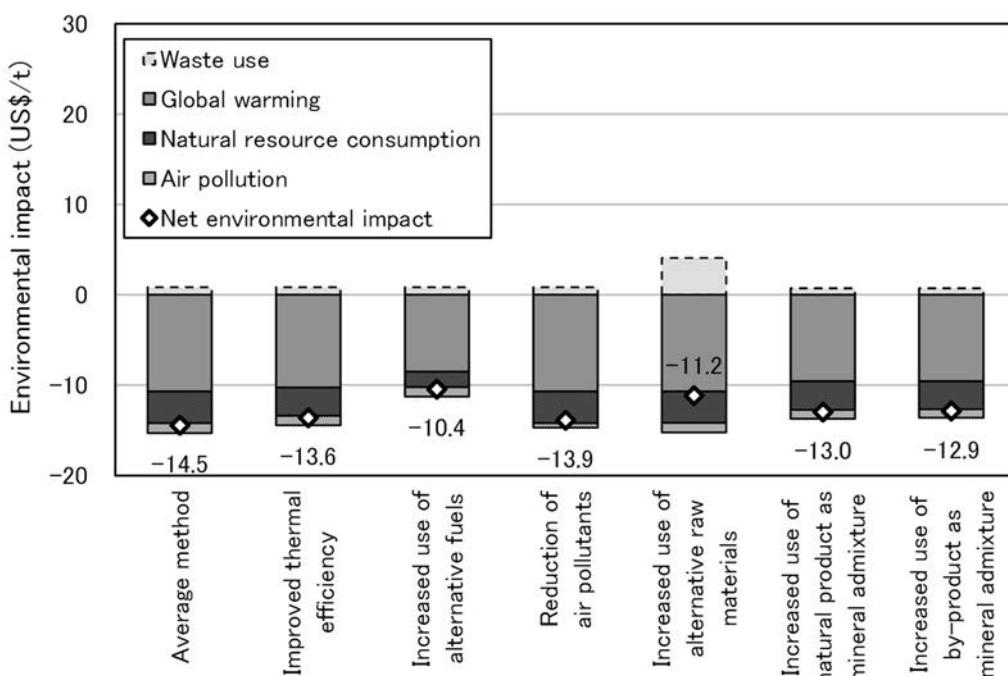


Fig. 2 Environmental impact of cement assessed by median value of LIME3
(LIME3 の中央値を用いたセメントの環境影響評価結果)

3.2 環境影響の大きい条件における環境負荷低減技術の評価

異なる環境条件における環境影響低減効果を評価するため、LIME3の75パーセンタイル値を用いて評価した結果をFig.3に示す。典型的な環境条件での評価結果と比較して、地球温暖化以外の影響領域の寄与が大きくなり、CO₂排出のみでは環境影響を適切に評価できない結果が得られた。

本条件では、「代替原料比率の増加」による環境影響低減効果は最も大きくなり、廃棄物の活用による環境貢献は、他の環境負荷の合計値より大きく、環境影響が正の値となった。廃棄物の環境影響は埋立処分場の社会資産としての寄与が大きく、この寄与が大きい国では優先的に取り組むべき方法であることが示唆される。なお、ここでの社会資産とは、埋立処分場を枯渇性資源とみなした場合の社会全体の資産にあたり、日本のように候補地が少なく、その価値が高い場合にはその値が大きくなる。ただし、LIME3における日本以外の廃棄物に関する統合化係数の推定精度が低いことから、評価結果の信頼性は他の結果より低いと考えられる。「大気汚染物質の低減」に関しても、LIME3の75パーセンタイル値を用いた場合では改善効果が相対的に大きくなかった。大気汚染物質の環境影響は人間健康への被害であり、拡散範囲に居住する人口が多い国では、重要な課題の一つとなることが示唆された。

4. まとめ

セメント産業における代表的な環境負荷低減技術を、複数の影響領域と環境条件を考慮した環境影響評価手法であるLIME3を用いて評価し、各技術の効果を総合的な視点から示した。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 世界全体の典型的な環境条件では、地球温暖化が最も重要な影響領域となった。また、「代替エネルギー比率の増加」の環境負荷低減効果が最も大きく、CO₂排出低減と化石資源の消費低減の効果が得られた。
- (2) 環境影響が相対的に大きい国では、「代替原料比率の増加」の効果が最も大きくなったことから、埋立処分場の社会的価値が高い国では本技術を優先的に実施すべきであることが判明した。
- (3) CO₂排出量は、環境影響の指標として適切でない場合があり、特に、環境影響が相対的に大きい国では、良い指標ではないことが判明した。

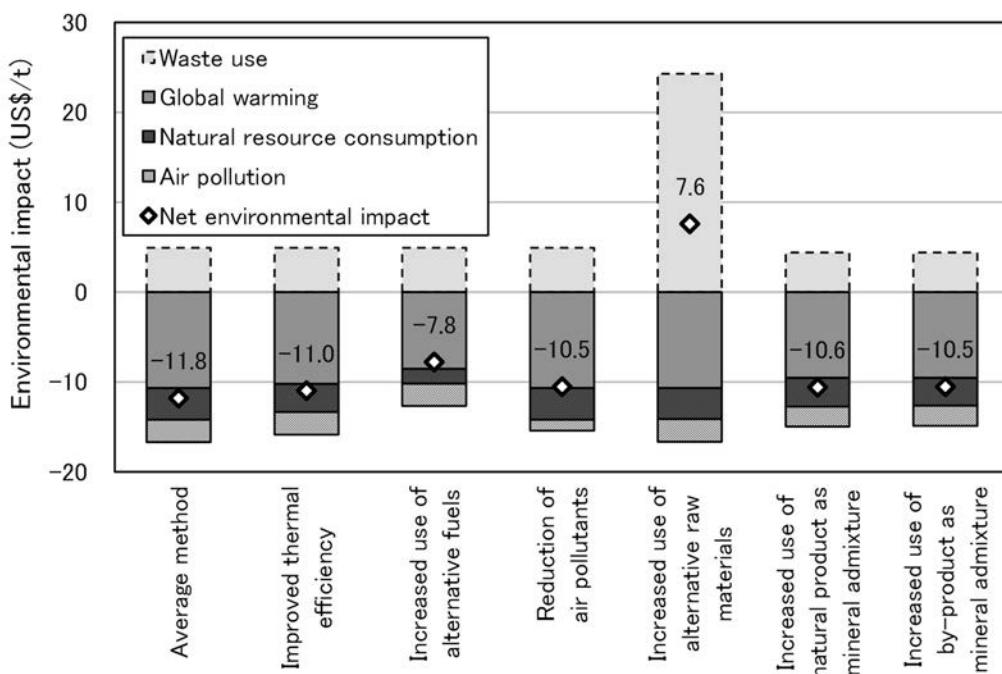


Fig.3 Environmental impact of cement assessed by 75 percentile value of LIME3 (LIME3 の 75 パーセンタイル値を用いたセメントの環境影響評価結果)

参考文献

- 1) G. Habert; S.A. Miller; V.M. John et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment.* 2020, 1(11), p. 559–573.
- 2) Global Cement and Concrete Association. *Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete.* 2021.
<https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>,
(accessed 2023-03-17)
- 3) Subhasis Pradhan; B.R. Tiwari; Shaileendra Kumar et al. Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix. *Journal of Cleaner Production.* 2019, 228, p. 679–691.
- 4) Bruno L. Damineli; Fernanda M. Kemeid; Patricia S. Aguiar et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites.* 2010, 32(8), p. 555–562.
- 5) Atsushi Inaba; Norihiro Itsubo. Development of global scale LCIA method. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 2018, 23(12), p. 2271–2275.