

セメント分野における研究技術動向と セメント部会ロードマップ

Recent Trend of Research and Technology in Cement and The Road Map of Cement Division
Key-words : Cement division, Cement, Research and technology, Roadmap, Environmental impact reduction

星野 清一・岡村 隆吉・三浦 啓一

Seiichi HOSHINO, Takayoshi OKAMURA and Keiichi MIURA
(Taiheiyo Cement Corporation)

1. はじめに

セメントは社会基盤の構築には必要不可欠な材料であり、何よりも安心、安全を提供することを一つの責務として負っている。したがって、これまでセメント、コンクリートの分野では、高性能化や高耐久化のための研究が幅広く行われてきており、現在においても変わっていない。一方で昨今では、世界的な環境負荷低減の流れの中で、従来からの高性能、高耐久化の追求は勿論のこと、以前にも増して低炭素化や省エネルギー化を果たしていくことも求められるようになってきている。また、環境問題といった点では、特に国土が限られた我が国においては、他の産業から発生した廃棄物・副産物を活用していくこともセメント産業が果たすべき役割の一つとなっている。

本稿では、これらのうち特にセメント分野における廃棄物・副産物の活用、CO₂排出量の削減、および省エネルギー化に関連する昨今の研究開発状況にトピックスを当てて概説するとともに、後半ではそれらの背景も踏まえ、2010年度版をベースに再作成したセメント部会のロードマップについて解説する。

2. セメント分野における廃棄物・副産物活用、 低炭素化および省エネルギー化に関わる現状

セメントは、他の産業から発生した廃棄物・副産物を原料や熱エネルギーとして活用することにより、日本国内の資源循環の推進に大きく貢献している。（ここでは、一般に市場価値が高く有償の製品として扱われているものを副産物、また市場ニーズが少なく本来廃棄されることが想定されるものを廃棄物と位置付けた。）セメント産業における廃棄物・副産物の活用に

より、我が国の産業廃棄物最終処分場の残余年数は9.4年延長されているとも見積もられており¹⁾、その効果は非常に大きい。また、昨今のセメントの環境影響評価結果では、セメントの廃棄物活用による環境への貢献は、CO₂排出による環境負荷と比較しても、決して小さなものではないとの評価結果も示されている²⁾。特に日本のセメント産業における廃棄物の活用やその技術は世界的に見ても独自性が高く、また高度なレベルにある。

図1に世界のセメントメーカーにおける代替原料率とクリンカー／セメント比の関係³⁾を示す。クリンカー／セメント比が高いほどセメント中に用いられている混合材（高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末など）の割合が少なく、よりポルトランドセメントの構成割合が高いことを示している。本図において、カテゴリーIに属するメーカーは代替原料（廃棄物・副産物）と混合材の使用割合が共に少なく、天然原料を多く用

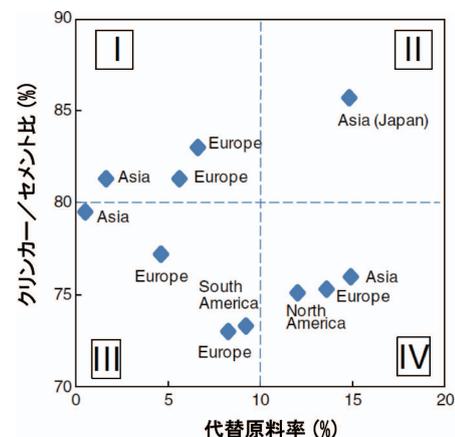


図1 世界のセメントメーカーの代替原料率とクリンカー／セメント比³⁾

いたポルトランドセメントの生産が相対的に多いと考えられる。カテゴリ II は代替原料の使用割合が高い一方で、混合材の使用割合が少ないことから、代替原料を多く活用したポルトランドセメントの生産が多いことを示唆している。カテゴリ III は代替原料の使用割合は少ないが、混合材の使用割合は高く、石灰石微粉末などの天然原料を混合した混合セメントの生産が多いことを示唆している。また、カテゴリ IV は代替原料の使用割合が高く、混合材の使用割合も高いことから、高炉スラグやフライアッシュなどの副産物混合材を用いた混合セメントの生産が多いことを示唆している。

日本のセメント産業はカテゴリ II に位置しており、また他国ではこのカテゴリに位置するメーカーは見られない。すなわち、クリンカーを製造する工程に対して多くの代替原料、取り分け他の産業から発生した廃棄物を使用しセメントを製造していることが、他国には見られない日本独自の特徴といえる。これは必ずしもセメント産業ばかりでなく、日本の社会におけるその必要性を反映したものとも捉えることができる。

一方、セメント産業では、昨今の世界的な低炭素化の動きの中で、製造過程もしくは使用段階におけるCO₂排出量削減や省エネルギー化も重要な課題の一つとなっている。セメントは、製造過程で少なからぬCO₂を排出する。その量はセメント1t当たり約760kgであり、内訳としては約60%が原料である石灰石の脱炭酸、約40%が化石エネルギーの燃焼に由来する。セメント産業からのCO₂排出量は、日本のCO₂総排出量の3~4%程度であり、この数値が大きいかわかりかたは見る者によって判断が分かれるところではあるが、少なくとも我が国が掲げるCO₂排出削減目標(2030年度に2013年度比-26%)の中で、これを削減していくことは産業としての一つの責務とも言える。

セメント産業では、これまで経団連の環境自主行動計画のもと、地球温暖化への取り組みとして自主行動計画を策定し、製造用エネルギー原単位を2012年までの間に1990年度比で4.4%削減してきた⁴⁾。その後、セメント産業では地球温暖化対策に一層の貢献を果たすため、2020年度に向けた「低炭素化社会実行計画」、ならびに2030年度に向けた同フェーズIIを策定している。このフェーズIIでは、省エネ技術の普及およびエネルギー代替廃棄物等の使用拡大により、2030年度のセメント製造用エネルギー原単位を2010年度実績から49MJ/t削減し3410MJ/tとすることを目標としている¹⁾。また併せて、革新的技術の開発として、鉱化剤の使用によるセメントクリンカーの焼成温度の

低減や、鉱物組成の高間隙質化と混合材の組み合わせによる省エネルギー化などが一例として挙げられており、これによりエネルギー原単位を2030年度までに2010年度実績から3%低減することを目標として掲げている。

日本のセメント産業は、世界的に見ても既にトップレベルの省エネルギー生産を達成している現状にはあるが、今後も更なる省エネルギー化やCO₂排出量削減のための研究開発が必要とされている。

3. 廃棄物・副産物活用、低炭素化、および省エネルギー化のための技術の現状と今後

3.1 高間隙質セメント

セメント製造では、主にSiO₂の供給源として廃棄物原料が用いられているが、多くの廃棄物はセメントの化学成分と比較してAl₂O₃が多い傾向にある。そのため、廃棄物使用量の増大を指向すると、現在のセメントに比べて間隙相であるC₃A(3CaO・Al₂O₃)相やC₄AF(4CaO・Al₂O₃・Fe₂O₃)相が増加することになる。間隙相量の増加は、クリンカーの易焼成を上げることから焼成温度の低減による省エネルギー化が期待できる一方で、流動性の低下や水和熱の増大など品質上良くない影響も懸念され、これらの改善が必要となる。

間隙相量の増加に対しては、これまで比較的多くの研究がなされており、例えば廃棄物使用量と強度、水和熱の観点から汎用セメントとして可能性のある組成領域などが示されている⁵⁾。

このようなもと昨今では、省エネルギー化のほか廃棄物使用量の増大を想定し、C₃A量やC₄AF量を増加させたクリンカーの研究が行われ⁶⁾、実際に焼成温度や焼成に必要な熱量の低減が図れたことが示されている。また、混合材として石灰石微粉末を5~10%混合することにより、更なる省エネルギー化やCO₂排出量の削減を図ると同時に、C₃Aクリンカーと石灰石微粉末の組み合わせによる強度の増進により、クリンカー量を低減した中でもモルタル強さや品質を確保したセメントが得られたことが報告されている。

C₄AF量を増加させたクリンカーについては、実際のキルンを用いた試製も行われ、熱量原単位が5%削減できたことや、焼成温度が100℃程度低減してもクリンカー鉱物が十分に生成され良好な強度発現性が得られた例が報告されている⁷⁾。これらの他にも、間隙相量の増加を指向したセメントの研究は近年盛んに行われており^{8),9)}、今後は実用化も含めさらに発展していくことが期待される。

3.2 鉱化剤による焼成エネルギーの低減

セメントの省エネルギー化、低炭素化を図る方策の一つとして、クリンカーの焼成時に、鉱化剤として作用する少量成分を添加し焼成温度を低下させる方法が挙げられている。クリンカーの焼成温度を低下させる鉱化剤については、これまでに多く確認されているが、そのうちフッ素については検討されている例も多い。

国内ではこれまで、電気炉を用いた実験室レベルでの研究は見られたが、近年では省エネルギー化や低炭素化などの社会的なニーズの高まりもあり、従来の実験室規模からテストキルンへとスケールアップした試製造も行われている¹⁰⁾。その結果、鉱化剤の添加によって、より低温での焼成が可能となることが実証されている。また、適量の鉱化剤と融剤の添加によってモルタル強さが増加することなども確認されており、省エネルギー化や低炭素化技術の一つとして有効であることが示されている。

3.3 混合材の活用による低炭素化技術

セメント、コンクリートのCO₂排出量を低減する方法のひとつとして、高炉スラグやフライアッシュといった無機質混合材をセメントに混合する方法が挙げられる。これらは既に、汎用的にセメント、コンクリート用の混合材として用いられており、多くの実績も有しているが、昨今では特に低炭素化を目的に、混合量をさらに増加させるための研究がなされている。一方で、高炉スラグやフライアッシュを用いたセメントは、一般にポルトランドセメントと比較して強度の発現が遅いことや中性化の進行が速いことから、これらの性能を改善、もしくは最適化するための研究などが行われている。

高炉スラグを利用した低炭素セメント、コンクリートについては、例えば高炉スラグの混合率を60%以上まで増加させたもとの、中性化抵抗性の低下を改善するとともに、高強度化や低発熱化などの性能も付与したセメント、コンクリートの開発例が見られる¹¹⁾。また、高炉スラグなどの混合材をセメントに対して70%以上混合することで、CO₂排出量を60~80%低減したコンクリートの開発例も見られている¹²⁾。これらコンクリートの性能に対しては、主要材料の一つであるセメントの性能が寄与する部分も大きいことから、高炉スラグを高含有したセメントの研究開発や材料設計も同時に行われている。この一例としては、材料設計の観点から高炉スラグの混合量や粉末度¹³⁾、また石膏添加量¹⁴⁾などが強度特性や発熱特性に与える影響について調査・研究を行っている例があり、低炭素セメントとしての最適な材料設計について言及さ

れている。

フライアッシュについては、副産物の活用や低炭素化の観点からさらにセメントへの混合率を増加させるための研究や、より広い範囲への普及を目指した研究が行われている。例えば良質の骨材が入手しにくい北陸地方では、フライアッシュのアルカリ骨材反応の抑制効果といった特性も生かし、産学官の共同により、フライアッシュを活用したコンクリートの普及や仕様化、供給体制の整備を図るための取り組みが行われている¹⁵⁾。

また、強度発現性の観点からは、フライアッシュセメントの基材となるセメントの品種を変更したり、専用のセメントを設計することも有効と考えられる。後者に関しては、基材のセメントを高C₃S(3CaO・SiO₂)化し、フライアッシュセメントとしての初期強度を向上させた例¹⁶⁾やその水和反応を示した報告¹⁷⁾などがみられる。この検討では、従来のセメントの強度を確保したうえで低炭素化を果たせる可能性もあることから、汎用的なセメントとしても期待できるとしている¹⁶⁾。また、フライアッシュに関しては、高炉スラグと併用することで、より一層の低炭素化を図っている例もみられる。

また昨今では、フライアッシュなどの無機質微粉末と、珪酸ナトリウム水溶液などのアルカリシリカ溶液から成り、それらの縮重合反応によって強度を発現させるジオポリマーセメントの研究も盛んになっており、将来の実用化が期待されている。

これらはいずれも、低炭素化のための技術として更なる発展が期待される。

4. セメント部会のロードマップの概略

以上で概説した背景なども踏まえ、今般改訂を行ったセメント部会のロードマップを図2に示す。セメント部会では、「より安心・安全な社会基盤の構築のみならず、地球環境や省エネルギー社会の実現などへも配慮した次世代のセメントの研究・開発を推進するとともに、部会内外の情報交換、交流を促進する」ことをミッションとして、以下の研究開発を推進する計画としている。

- ①安心・安全な社会基盤の構築と長寿命化に寄与するセメントの技術開発
- ②環境負荷低減に寄与するセメントの技術開発
- ③他部会との連携によるセメント周辺技術の研究・開発
- ④従来のセメントに捉われない新規セメント／材料技術の創出

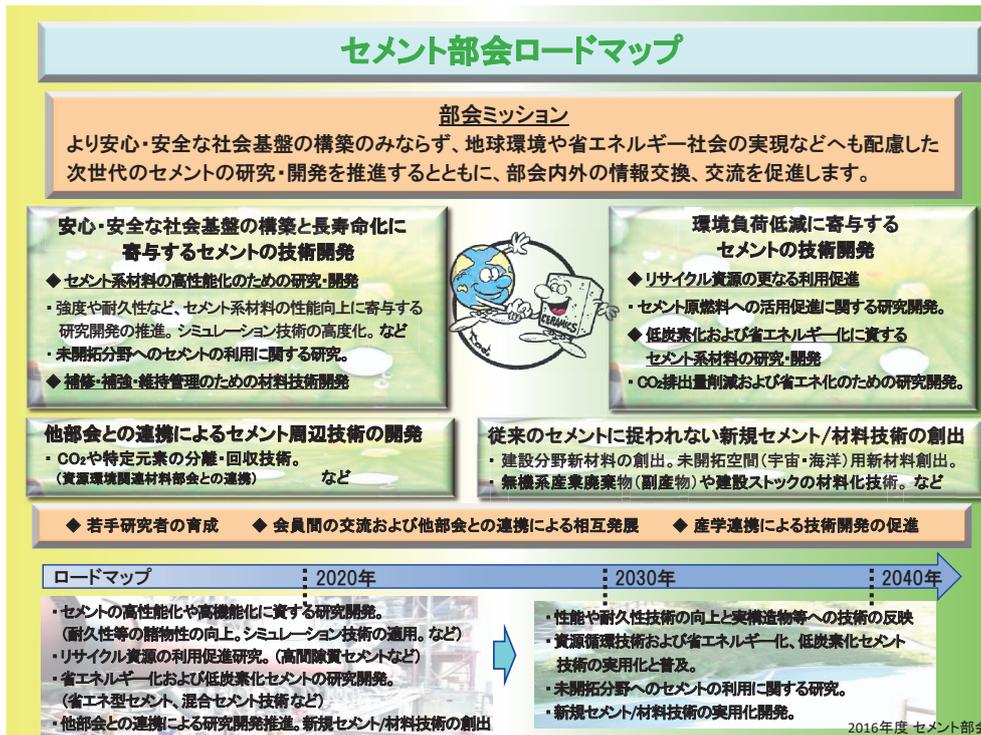


図2 セメント部会ロードマップ

①については、その領域が多岐にわたることから、本稿では説明を割愛した。しかしながら、セメントは社会インフラの構築には欠かすことのできない材料であり、安心・安全はもちろんのこと、現在では建造物の長寿命化の観点から、以前にも増して高耐久な性能を付与していくことも重要になっている。これは、今後も変わることはないと考えられる。したがって、セメント系材料の高性能化、高機能化のための研究は重要であり、硬化前から硬化後の一連の性能(強度や各種耐久性能など)向上に寄与する研究開発は、今後にわたっても部会として取り組むべき課題である。

②の環境負荷低減に寄与するセメントの技術開発については、前章までに概説した通りであり、その社会的ニーズは今後も増すものと考えられる。したがって、リサイクル資源の更なる利用促進として、セメント原料や熱エネルギーへのリサイクル資源の活用促進を図るための研究を推進する。また、低炭素化および省エネルギーに資するセメント系材料の研究についても推進する。リサイクル資源の活用と、低炭素化や省エネルギーに関わる技術は、相互に関連し合うものも多く、それぞれ単独のカテゴリーとしてだけでなく、三位一体の環境課題としても取り組む。

③の他部会との連携については、従来のセメント部会内での取り組みにとどまらず、他の部会との連携により、部会横断型の課題の創出や設定、およびその推

進を図ることを目指す。

セメントは、本稿でも取り上げたように建設資材としての役割のみならず、資源循環への貢献を既に産業レベルとして実践してきている。また、CO₂排出量削減や省エネルギー化のための研究開発にも見られるように、環境関連技術とも密接に関係している。その点では、例えば資源・環境関連材料部会などと共通した技術領域もあり、相互に連携した新たな研究課題の創出や取り組みも有益であると考えられる。また、環境関連分野のみならず他部会との情報交換の場を通じ、連携可能な新たな技術の発掘や研究の推進を図っていきたく考えている。

④の従来のセメントに捉われない新規セメント/材料技術の創出については、特に長期的な視点から、次の時代を担う革新的な材料や技術、用途の創出、ならびにそのための研究に取り組む。ロードマップ中の項目については一例を挙げたまでに過ぎないが、部会が持続的な発展を遂げるためには、常に新しい技術の創出は不可欠であり、特に産学が連携した萌芽的な取り組みなどにより目標の達成を図っていく。

5. おわりに

セメント部会では2010年度に作成したロードマップを改訂し、先般2016年度版のロードマップを新たに作成した。このロードマップでは、セラミックス協

会科学技術委員会によってまとめられた「化学の夢ロードマップ」を受け、それを実現するための部会としての方針や課題を示した。この中にはここ10年前後の比較的現実味のある内容から、2040年までの長期的な「夢」と思われる内容も含まれている。内容については、今後もしかるべき時期に見直しがなされ、その時々的情勢を踏まえて改訂がなされていくものとは思いますが、将来、今回のロードマップの目標が達成され、今まで以上に部会やセメントという材料が社会に貢献する存在になっていることを期待したい。

文 献

- 1) セメント協会, “低炭素化社会実行計画フェーズII” (2014).
- 2) 星野清一, 河合研至, 久保田修, 平尾 宙, セメント・コンクリート論文集, 69, 679-686 (2015).
- 3) E. Gartner and H. Hirao, *Cement and Concrete Research*, 78, 126-142 (2015).
- 4) セメント協会ホームページ, 持続可能社会に向けた取組, 自主的な行動計画, URL: <http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan02/seisan02b.html>
- 5) 丸屋英二, セラミックス, 48, 111-116 (2013).
- 6) 安藝朋子, 新島 瞬, 黒川大亮, 平尾 宙, セメント・コンクリート論文集, 68, 103-109 (2014).
- 7) 茶林敬司, 新見龍男, 永田宏志, 加藤弘義, セメント・コンクリート論文集, 69, 124-130 (2015).
- 8) 三隅英俊, 伊藤貴康, 高橋俊之, 丸屋英二, セメント・コンクリート論文集, 68, 133-139 (2014).
- 9) 後藤貴弘, 中村俊彦, 高尾 昇, 鳴瀬浩康, セメント・コ

- ンクリート論文集, 64, 219-224 (2010).
- 10) 上河内貴, 福山信吾, 山下純成, 横尾 一, 第68回セメント技術大会講演要旨, 208-209 (2014).
- 11) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵 清, 木之下光男, 釜野博臣, コンクリート工学, 48, 69-73 (2010).
- 12) 小林利充, 一瀬賢一, 生産と技術, 67, 58-60 (2015).
- 13) 大塚勇介, 植木康知, 日本セラミックス協会2013年年会講演予稿集, 2L24 (2013).
- 14) 佐川孝広, 小倉 東, 日本セラミックス協会2013年年会講演予稿集, 2L23 (2013).
- 15) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会, “コンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指して—報告書(富山・石川・福井版)” (2013).
- 16) 諸田賢也, 宮澤伸吾, 日本コンクリート工学会関東支部栃木地区研究発表会要旨 (2015).
- 17) 向 俊成ほか, 日本セラミックス協会2016年年会講演予稿集, 2L19 (2016).

筆 者 紹 介

星野 清一 (ほしの せいいち)

専門はセメントの化学と品質に関する研究開発。

[連絡先] 〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部セメント技術チーム

E-mail : seiichi_hoshino@taiheiyo-cement.co.jp

岡村 隆吉 (おかむら たかよし)

専門はセメントの化学, 品質, 製造, 太平洋セメント(株)中央研究所所長。

三浦 啓一 (みうら けいいち)

専門は環境技術, セラミックス, 太平洋セメント(株)取締役 常務執行役員。