

脱炭素社会に向けた建設業界の取り組み

樋口 善彦*

Efforts for Decarbonization Society in Construction Industry

Yoshihiko HIGUCHI*

Synopsis: Recent trend of increasing climate variation partly results from global warming due to increasing carbon dioxide content in the air. Therefore, it is important to suppress the emission of carbon dioxide associated with human activity especially in construction industry because large amounts of carbon dioxide are emitted during manufacturing cement or concrete. In the present report, the efforts for decarbonization society in construction industry are presented in the viewpoint of reduction and absorption of carbon dioxide in the concrete making process and utilization of geo-polymer in which cement and concrete are not used.

Key words: cement, BF cement, concrete, CO₂ absorption, geo polymer

1. 緒 言

近年、地球温暖化による気候変動の増大が危惧されている。国際連合から 2021 年 8 月に出されたニュースプレス¹⁾では、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の最新報告書に言及して、地球の平均気温の上昇量が産業革命 1.5℃を越えると現在よりも気候変動が激しくなると発表されている。世界の各地で台風やハリケーン、局地的な集中豪雨の発生状況が変化する傾向が見え始めており、気候変動が人々の生活基盤や経済界、産業界に及ぼす悪影響も顕在化しつつある。その結果、世界各国で地球温暖化ガスの一つである CO₂ 排出量を削減する目標年度を繰り上げる動きが活発化している。例えば、米国は 2025 年に 26-28%削減だった目標が 2030 年に 50-52%削減へ、英国は 2030 年に 55%削減から同年 68%削減へ、カナダも 2030 年に 30%削減から同年 40-45%削減へ前倒しがされている。これまで、CO₂ 削減に消極的だった中国も 2060 年にカー

ボンニュートラルを達成する目標を発表している。このような国際情勢の中で、日本も 2030 年に 26%削減から同年 46%削減へと目標を上方修正している。ところで、2019 年度の日本の CO₂ 排出量²⁾は 11 億 794 万トンであり、2013 年度から約 14.0%減少しているものの、中国、米国、インド、ロシアに続く世界第 5 位の CO₂ 排出国であり、その削減動向は世界から注目されている。日本の排出量(間接排出量)の内訳²⁾は、多い順に産業部門 34.7%、運輸部門 18.6%、業務その他部門 17.4%である。産業部門のうち、建設業界あるいはそれに関連するセメント業界での CO₂ 排出量が比較的多い。そこで、本稿では建設業界の現状と脱炭素社会の実現に向けた具体的な対策などを整理して紹介する。

2. 建設業界における取組

セメント協会³⁾は最近のセメント生産量が年間 6000 万トン前後で推移しており、その製造工程で 4000 万トンの CO₂ を排出していると報告している。セメントは原料の石灰石(主成分が炭酸カルシウム、CaCO₃)を粉砕する原料工程、粉砕した原料を

* 産業技術短期大学教授 博士(工学) 機械工学科

1450°Cの高温で焼いてクリンカにする焼成工程、これに石膏を加えて粉砕する仕上げ工程を経て製造される。焼成工程では、高温状態を作るために燃料を燃やすことでCO₂が発生し、さらに反応式(1)のように石灰石が分解することによって、CO₂が発生する。また、全工程で電気エネルギーを使用することで間接的にCO₂を発生させている。以上の理由からセメント業界のCO₂発生量は産業界の中でも多い部門の一つになっている。



また、セメントに細骨材や粗骨材を混ぜて製造するコンクリートは1立方メートル当たり250kgのCO₂が排出されると報告されている。また、全世界のCO₂排出量の約10%がセメント・コンクリート業界からのものであるといわれている⁴⁾。

以上のように石灰石を原料として作られるセメントはポルトランドセメントと呼ばれ、従来からCO₂排出量を削減する方策がとられてきた。その一つに、製鉄業界の生産時に副次的に発生する高炉スラグを微粉末にしてポルトランドセメントと混ぜて作られる高炉セメントがある。高炉セメントは高炉スラグで置き換えられた分だけ石灰石の使用量が減少するため、ポルトランドセメントに対してCO₂発生量を40%削減することができる。2001年には「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」(グリーン購入法)の公共工事における特定調達品目に指定され、全国のセメントの20%、東京都の大規模建設物に限定すると33%以上のシェアに到達している^{5,6)}。

日本建設業連合会では、建設業の環境自主行動計画を作成し、低炭素型コンクリートの活用等を通じて脱炭素社会に取り組み2030-2040 粘度の早い段階で2013年度に対してCO₂排出量を40%削減することを公表している⁷⁾。

3. コンクリートのCO₂吸収能力

コンクリートを用いて建造された構造物は寿命を迎えた後に解体され、一部再利用されるが、その過程で大気中のCO₂を吸収すると言われている。そこで、最初にコンクリートのライフタイム全体での正味のCO₂排出量を評価しておくことにする。

セメントは複数の鉱物相から構成されており、多い順に示すとエーライト(3CaO・SiO₂)、ビーライト(2CaO・SiO₂)、カルシウムアルミネート(3CaO・Al₂O₃)、フェライト(4CaO・Al₂O₃・3Fe₂O₃)である。セメントに水混ぜて混練し、養生すると水和反応が起こり、トベルモライト(2CaO・SiO₂・3H₂O)、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)、モノサルフェート(3CaO・Al₂O₃・CaSO₄・12H₂O)などの水和物が生じて硬化する。大気中のCO₂を吸収する炭酸化では、炭酸水素イオンを溶解した水分がコンクリートと接触し、上記の水和物からもたらされるカルシウムイオンと反応して炭酸カルシウムが生成する。これによってコンクリートの空隙水はアルカリ性から徐々に中性化していく。この反応が進む速度は様々な条件の影響を受け、土木学会⁸⁾や日本建築学会⁹⁾で算定式が提案されている。また、ここでは言及しないが、これ以外にも各種要因を個別に評価した調査が多数報告されている。

これらの報告をもとにして、コンクリートのCO₂吸収量に関する様々な評価されている。例えば、兵頭ら¹⁰⁾は解体・再利用を含めた合計のCO₂吸収量は年間210~510万トン、CO₂吸収率は10~25%であると推定している。以上の推定から、現状のコンクリートは使用中にCO₂を吸収するが、その吸収量は年間排出量である4000万トンに対しては、必ずしも十分ではないことがわかる。

4. コンクリート製造・利用時のCO₂削減

前節で述べた通り、コンクリートによるCO₂吸収を加味しても、コンクリート業界においてCO₂排出量を削減することは大きな課題であり、コンクリート構造物を長持ちさせて使用量を減らすこと、発生した二酸化炭素を回収して貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)や回収して有効利用するCCU(Carbon Capture and Utilization)を推進すること、さらに製造時にCO₂が発生しないコンクリート代替物を開発することが求められている。

4.1 コンクリート長寿命化

コンクリートは水和反応を利用して硬化させるため施工時に水を加えているが、長期間使用すると

水分濃度が減少し収縮し始め、割れによる劣化が不可避免的に生じる。ひび割れ箇所を定期的にチェックし、その都度補修するには多大なコストがかかるために各種の自己治癒コンクリート(self-healing concrete)が考案されている。従来の自己治癒コンクリートは割れ箇所に染み込んだ水により局所的に膨張させるタイプや水和物を生成させてひびを埋めるタイプが一般的であった^{11,12)}。

2007年、バクテリアなどの微生物を利用して自己治癒する画期的なコンクリートがデルフト工科大学の H.M.Jonkers 准教授¹³⁾により発表された。コンクリート中に微生物と乳酸カルシウムをあらかじめ混ぜ込んだコンクリートを打設すると、外部から遮断された微生物は休眠状態になるが、年月の経過とともに発生するひび割れを通じて、外界の水と空気と接触することによって活動を開始し、乳酸カルシウムをもとに炭酸カルシウムが生み出されることでひび割れが閉塞するという原理である。ひび割れが閉塞して外界から遮断された微生物は再び休眠状態となり、次にひび割れが発生した時に活動を再開する。最近、この技術の適用が各社から発表されており¹⁴⁻¹⁶⁾、コンクリートの長寿命化による CO₂ 削減が期待されている。

4.2 コンクリートへの CO₂ 吸収

発生した二酸化炭素を回収して貯留・利用する CCS, CCU についても研究開発が進んでいる。鹿島建設¹⁷⁾は石灰石の焼成時や火力発電所創業時に発生する二酸化炭素を回収して、特殊混和材と石炭灰を使用したコンクリートに吸い込ませる技術(強制炭酸化養生)を「CO₂-SUICOM」の名称で開発している。特殊混和剤は化学工場からの副産品である消石灰から製造した γ -2CaO·SiO₂ や火力発電所の副産品である石炭灰から構成されており、セメント使用量自体を削減することが可能である。この CO₂ 吸収とセメント削減の効果を合わせるとプレキャストコンクリート型枠パネル製造時の CO₂ 発生量を実質的にゼロ以下にすることができると報告されている。さらに、東京ガスと都市ガスの燃焼排ガス中の CO₂ の回収固定化で協力することが発表されており¹⁸⁾、この技術の適用拡大が期待されている。

ただし、この技術は CO₂ 吸収のための炭酸化養生槽が必要であり、現場打設ができないという課題があり、適用する際の制約が存在している。また、一般的なコンクリートは水和反応によって生じる Ca(OH)₂ によって内部の PH が 12 から 13 のアルカリ性を示すのに対し、「CO₂-SUICOM」では酸性である CO₂ の吸収によって中性に近づいていくため、無筋コンクリートの場合には問題ないが、鉄筋コンクリートの場合には鉄筋の腐食を抑制する機能が失われてしまう懸念がある。後者については、水和反応に関与していないセメントがあらためて Ca(OH)₂ を生成することによって、通常のコンクリートと同等のアルカリ性が維持されるため、鉄筋腐食には影響しないという意見もあるが、この点は現時点でも明確にはなっていない¹⁹⁾。

これらの課題を解決するために、鹿島建設、中国電力、三菱商事は共同で新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)に 2020年 8 月採択された公募委託事業「CO₂ 有効利用コンクリートの研究開発」を進めている²⁰⁾。

なお、セメントの一部を高炉スラグで置き換えた高炉セメントはグリーン購入法の特定調達品目として利用されていることはすでに述べたが、最近になって高炉スラグの配合率を高くしたコンクリートの開発が活発化している²¹⁾。従来、高炉スラグ配合率を高めすぎると、コンクリート表面での剥離が生じるアブサンデン現象が生じやすいと言われていたが、宮原ら²²⁾は結合剤に高炉スラグ微粉末、刺激剤に水酸化カルシウムを用いて、高炉スラグの配合率を高めたコンクリートの製造が可能であると報告している。

大成建設はこれらの知見をもとに、セメント原料に占める高炉スラグの比率を従来よりも大幅に高めることができるコンクリートを 2014 年に開発し、「TeConcrete」と命名している²³⁾。さらに、排ガスから回収した CO₂ をコンクリート内部に固定する技術を開発し、「TeConcrete/Carbon-Recycle」と名付けている²⁴⁾。この技術は CO₂ を直接コンクリートに接触させるのではなく、いったん炭酸カルシウムにしてから結合剤である高炉スラグと混ぜて使用するために、コンクリートは高アルカリ性を維持できることから鉄筋コンクリートへの適用が

可能で、従来の設備をそのまま使って現場打設も可能であると、と報告されている。

NEDOのムーンショット型研究開発事業「C4S研究開発プロジェクト」を推進する産学連携グループは、構造物の解体等にもなって発生する廃コンクリートを破碎して得た細粒と大気中の希薄な濃度のCO₂との反応によって炭酸カルシウム析出を促し、これらを一体化して硬化体CCC(Calcium Carbonate Concrete)にする技術を開発した²⁵⁾。従来は産業廃棄物であった廃コンクリートが資源としてリサイクルされ、その上に大気中のCO₂を吸収し有効利用するという技術である。課題は製造したコンクリートの強度を現状の8MPaから2030年に30MPaに引き上げることだが、実用化の際には大気中CO₂削減に大きく貢献する可能性がある。

4.3 セメントフリーコンクリート

ここまでは、原材料としてカルシウムを使用することを前提としてコンクリートを製造・利用する技術を紹介したが、次にカルシウムフリーのコンクリートであるジオポリマーについて述べる。ジオポリマーとはフランスのDavidovits²⁶⁾が発見した珪酸アルカリ性溶液とメタカリオンを混合する手法により形成された固化重合体である。現在、高炉スラグの微粉末やフライアッシュなどを原料とする珪酸アルミニウムとアルカリ溶液を混ぜて作られるのが一般的であり、セメントのように石灰石の焼成にもなうCO₂発生がないことが特徴である。アルカリ溶液と接触した珪酸アルミニウムからSiイオンとAlイオンが溶け出し、縮重合反応により固化体を形成する。一般的なコンクリートと比較して、耐酸性および耐熱性に優れており、コンクリートや鋼材との付着性が良好であることが知られている。最近の研究動向についての詳細は、恩田ら²⁷⁾、および、一宮²⁸⁾が解説している。

ただし、ジオポリマーにおける縮重合反応の進行速度や粘度を制御することは一般的に容易ではなく、施工時の可使時間が短い、高粘度のために狭い場所を充填するのが難しい、などの欠点を有していた。最近、この欠点を混和剤の工夫によって改善し、流動性を確保できる時間を長くし、粘度を低減できるようになり、従来のコンクリート用ミキサーやポンプが利用できるようになった。その事例として、

日本製鉄の東日本製鉄所鹿島地区構内の高温環境の擁壁(RC構造)補修工事への適用例が報告がされている²⁹⁾。また、もう一つの欠点である凍結時の性能低下という課題に対しても、最近では耐凍害性の高いジオポリマーが開発されたという報告があり、実用化が期待されている³⁰⁾。

なお、ジオポリマーの原料として想定されてきたのは石炭火力発電での副生成物であるシリカを主成分とする石炭灰だが、石炭火力発電を縮小させる世界的な動向が近年になって加速しており、長期的視点で考えると石炭灰の代替物を今から検討しておく必要がある。その候補としては、下水汚泥焼却灰³¹⁾や製紙スラッジ焼却灰などの活用が検討され始めている³²⁾。また、原田と田島は、砂型を用いた鑄造工程で発生する粉塵くずをジオポリマーの原料として利用できる可能性を見出している³³⁾。

5. 結 言

本稿では、地球温暖化ガスであるCO₂の排出量が相対的に多い建設業での脱炭素社会に向けての取り組みについて紹介した。従来のように、生産時にCO₂を排出する一方であった、セメントやコンクリートにCO₂を吸収させる技術が開発されつつある。このCO₂吸収技術は使い方にもよるが、実質的な排出量をゼロまたはマイナスにすることも可能である。また、CO₂排出の原因であったセメントを使用しないジオポリマーが最近になって実用化され、その扱いにくさも解消されて徐々に適用される場面が増えてきている。

これらの技術はコスト面や適用時の制約などの面で問題はあっても、将来に向けて利用量が拡大することでCO₂の排出量低減に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 気候変動は拡大し、加速し、深刻化している、<https://www.unic.or.jp/news_press/info/42637/>,(参照 2021-09-10)
- 2) 日本の部門別二酸化炭素排出量(2019年度), <<https://www.jccca.org/download/13335/>>, (参照 2021-09-10)
- 3) セメント業界におけるこれまでの省エネの取り組み並びに長期的展望について,<<https://www.>

- meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/031_04_00.pdf>, (参照 2021-09-10)
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書 (2010).
 - 5) 温暖化対策と高炉セメント：協会活動：鉄鋼スラグ協会,< <https://www.slg.jp/activity/ondanka.html>>,(参照 2021-09-10)
 - 6) 高炉セメント：グリーン購入法指定について <https://www.slg.jp/slag/green/g_cement.Html>,(参照 2021-09-10)
 - 7) 建設業の環境自主行動計画第 7 版,<https://www.nikkenren.com/kankyuu/pdf/indep_plan_7_web.pdf>,(参照 2021-09-10)
 - 8) コンクリート標準示方書[設計編] 2017 年制定, 日本土木学会, 2018.
 - 9) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 日本建築学会, 2016.
 - 10) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾 宙, 野村幸治：セメント・コンクリート論文集, **74**(2021),No.1, 333-340.
 - 11) 細田 暁, 岸 利治：コンクリート工学, **45**(2007), No.11, 3-6.
 - 12) 岸 利治：土木技術,**66**(2011),No.9,57-60.
 - 13) H.M.Jonkers: Self healing materials. Springer, Dordrecht, 2007,195-204.
 - 14) 自己治癒コンクリート材の量産技術を確立, <<https://www.aizawa-group.co.jp/news2020111401/>>, (参照 2021-09-10)
 - 15) 微生物の力でコンクリートのひび割れを閉塞, <https://www.toda.co.jp/news/2020/20201215_002867.html>,(参照 2021-09-10)
 - 16) 劉 宏濤：風力エネルギー,**44**(2020), 672-675.
 - 17) CO₂を強制的に吸収させるコンクリート「CO₂-SUICOM」を建築分野で初適用, <<https://www.kajima.co.jp/news/press/201201/30a1-j.htm>>, (参照 2021-09-10)
 - 18) 世界初！都市ガス機器利用時の排ガスを利用した「CO₂吸収型コンクリート」製造を開始,< <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000570.000021766.html>>, (参照 2021-09-10)
 - 19) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾 宙, 野村幸治：太平洋セメント研究報告, **179**(2020),15-30.
 - 20) 「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO₂有効利用拠点における技術開発」に係る実施体制の決定について,<https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100212.html>, (参照 2021-09-10)
 - 21) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政：コンクリート工学年次論文集, **32**(2010), No.1, 485-490.
 - 22) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋 剛：コンクリート工学年次論文集, **35**(2013), No.1, 1969-1974.
 - 23) CO₂排出 80%減, 「環境配慮コンクリート」を実施適用, <https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2014/140909_3940.html>, (参照 2021-09-10)
 - 24) カーボンリサイクル・コンクリート「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」を開発, <https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210216_5079.html>, (参照 2021-09-10)
 - 25) 世界初！CO₂を原料とする完全リサイクル可能なカーボンニュートラルコンクリートの基礎的製造技術を開発, < https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_202104151058544435600863.html>, (参照 2021-09-10)
 - 26) J.Davidovits: Geopolymer, chemistry and applications,3rd. ed., Institut Geopolymere (2011).
 - 27) 恩田陽介, 佐々木 亘, 谷口秀明：三井住友建設技術研究開発報告,**14**(2016),55-62.
 - 28) 一宮一夫：コンクリート工学, **55**(2017),No.2, 131-137.
 - 29) ジオポリマーコンクリートを大断面かつ狭あいな擁壁補修工事に適用,<https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330_1.html>, (参照 2021-09-10)
 - 30) 寒冷地でも適用可能な低炭素型コンクリートの開発および実用化に向けた試験体制の構築, <<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2021/07/210726.html>>,(参照 2021-09-10)
 - 31) 望月勇樹, 伊藤義也, 山口 晋, 前田正博：土木学会第 71 回年次学術講演会,2016, V-204.

32)李 柱国, 池田 攻: コンクリート工学年次論文
集, **38**(2016),2337-2342.

33)原田達也, 田島正弘: 島根県産業技術センター
研究報告, **56**(2020),1-6.