

はじめに

Introduction

山崎 章弘*
Akihiro Yamasaki

アジア太平洋研究特別号「コンクリートのリサイクルプロセス」をここに発刊する。本特別号は、2011年度から2013年度にかけて、成蹊大学 アジア太平洋研究センターのプロジェクトとして採択され、成蹊大学教授 山崎章弘を代表者として、工学院大学 酒井裕司准教授、東北大学 飯塚淳准教授を共同研究者として実施した、「中国における廃コンクリートリサイクル利用技術の評価」の成果をまとめたものである。本特別号は、以下の6編の研究論文からなる。

1. コンクリート廃棄物を利用した水質浄化技術 飯塚淳（東北大）、山崎章弘（成蹊大）
2. コンクリート廃棄物を利用した二酸化炭素の有効利用技術 飯塚淳（東北大）、山崎章弘（成蹊大）
3. コンクリートスラッジの直接炭酸塩化反応による二酸化炭素固定 野口美由貴（成蹊大）、山崎章弘（成蹊大）
4. 地球温暖化対策としての二酸化炭素の炭酸塩鉱物化プロセス 野口美由貴（成蹊大）、山崎章弘（成蹊大）
5. コンクリートスラッジを用いた炭酸塩鉱物化およびその利活用～エコタンカル®、PAdeCS®～ 佐々木猛（日本コンクリート工業）、八木利之（日本コンクリート工業）
6. 中国におけるコンクリート廃棄物及びセメント微粉末を利用した塩類土壌改良評価 酒井裕司（工学院大）、王昶（天津科技大）

このうち、論文5はプロジェクト実施期間に成蹊大学大学院 理工学研究科 物質生命コースに在籍し、環境化学工学研究室（山崎主宰）と日本コンクリート工業の共同研究を行った成果を含むものである。

コンクリートは、建築材料として莫大な量が使用されている。コンクリートの構成材料は、セメント、骨材（細骨材と粗骨材）であり、これらを混合し、水を加えることでセメント分が水和反応を起こし、カルシウム-シリカー水（C-S-H）構造を形成し、骨材部分を接着（セメンチング）することで、高強度な構造体を形成するものである。セメントの主原料は石灰石（ CaCO_3 ）であり、ロータリーキルン内で石灰石と粘土を1500℃程度まで加熱することでクリンカーとし、さらに石膏と混合してセメントが製造される。石灰石の加熱により CO_2 が発生することからセメント産業の CO_2 排出量は、我が国の全排出量の5%程度（5000万トン）とされている^{1,2}。さらに全世界ではセメント産業からの CO_2 排出量は全体の8%を占める³。

* 成蹊大学理工学部 Faculty of Science and Technology, Seikei University

世界のセメント生産量は、年間40億トンに達しており⁴、1990年にくらべて4倍程度まで増加している。国別でみると、中国が年間25億トン程度で、全世界の60%弱を占めている。我が国のセメント生産量は5500万トン前後である（1990年の約1/2）。中国のセメント使用量は、2011年から2013年の3年間で米国が20世紀の100年間に使用した量を凌駕するとされており、現在も増加傾向にある。さらに、インドのセメント生産量も増加傾向にあり、全世界生産量の8%を占める。このように、アジア太平洋地域、特に中国とインドにおけるセメント使用量の急伸とそれに伴うCO₂発生量の増加は大きな懸念材料となっている。セメント製造時、コンクリート使用時におけるCO₂発生量の削減は重要な課題となっており、セメント製造プロセスの省エネ化や、石灰石使用量を削減したセメントの開発などのセメント製造時におけるCO₂発生量の削減や、コンクリートの水和過程でのCO₂吹込みによる炭酸塩生成によるCO₂固定など、様々な方法が提案されている。中でも、水和反応が進行している生コンクリートにCO₂を吹き込むことでセメント中のカルシウムとCO₂から炭酸カルシウムの結晶を生成させて固定化する方法（CO₂ガスによる養生、CO₂ curing）は、炭酸カルシウム微結晶生成によるコンクリート強度の増大と、CO₂固定が同時に実現できる⁵。我が国でも、鹿島建設と中国電力、デンカが共同で開発した「CO₂-SUICOM（スイコム）」と呼ばれる環境配慮型コンクリートとそのCO₂養生法が実用化されている⁶。また、サウジアラビアの石油会社Aramocoでもコンクリート内に20%のCO₂を固定させる方法を開発、実用化している⁷。そのほか、CO₂養生コンクリート（Carboncure[®]）、低CO₂コンクリート（Solidia[®]）などが事業化がされている。中国においてもCO₂養生は盛んに研究されている。ただし、CO₂養生では実際にはCO₂の排出削減にならないとの批判もある¹⁰。

大量のコンクリートを使用したコンクリート建造物は50年から60年の後に寿命を迎え、建て替えが必要となる。コンクリート建造物からは大量の建設廃棄物が発生する。我が国の廃コンクリートの発生量は年間3000-4000万トン程度であり、高度成長期における大量のコンクリート建造物が今後寿命を迎えることから排出量は増加するものと予測されている。現在、回収後破碎・分級を行った後、大部分がリサイクルされている。しかしながら、その用途はほぼ路盤材であり、コンクリート中のカルシウム分などは有効利用されていない。また、道路建設が頭打ちになってきている現在、路盤材としての需要と、廃コンクリートの排出量のミスマッチが起こることが予想される。廃コンクリートの有効利用としては、骨材成分のリサイクルが実用化されている。コンクリート用の骨材は細骨材（砂）と粗骨材（砂利）であり、従来は川砂や川砂利が用いられてきた。しかしながら、現在では川砂も川砂利も枯渇しており、破碎した岩石や石灰石が用いられるようになってきている。骨材成分はセメント水和反応時には化学変化を受けないため、廃コンクリートから骨材を取り出すことができれば、再利用が可能である。しかしながら、廃コンクリートの破碎だけでは骨材成分とその周囲に付着したセメント（モルタル）成分の分離が困難である。モルタル成分はコンクリート製造時に水分を吸収し、コンクリートの強度を低下させる。したがって、リサイクル骨材として再利用するためには、十分モルタル成分を除去し、吸水率を低くする必要がある。JISでは、粗骨材では吸水率が3.0%以下、細骨材では吸水率が3.5%以下のものを再生骨材Hとして規定し、用途制限を設けていない。つまり、バージンの骨材と同等に扱われる。一方、吸水率は粗骨材で5%以下、細骨材で7%以下のものは再生骨材Mと規定され、乾燥収縮や凍結融解を受けにくい構造部材に使用が制限される。粗骨材の吸水率が7%以下、細骨材の吸水率が13%以下のものは、再生骨材Lと規定され、捨てコンなどの高い強度や耐久性が必要とされない部材に使用が制限される。さらに、絶乾密度についても規定があり、密度によっては再生細骨材として認められない場合もある。再生骨材Hを製造するには、通常の粉碎、分級に加え、様々な処理を行う必要があり、高コスト化につながる。また、建設現場での再生骨材の

普及も進んでいない。一方、セメント成分は化学変化を受けているため、そのままではセメントとしての利用は不可能である。しかしながら、水和セメント成分は、強アルカリ性を示すこと、またカルシウム分が豊富であることから含カルシウム材料、原料としての利用が期待される。論文1は環境浄化材料としての利用について述べたものであり、主として水溶液系での有害物質の除去への応用を試みている。論文2および論文4はカルシウム分を利用したCO₂固定法に関わるものであり、生成物として炭酸カルシウムが得られる。炭酸カルシウムは広汎な応用分野を持つ材料であり、石灰石代替としてのセメント原料のほか、紙やプラスチックのフィラー（添加物）、薬品などに適用可能である。セメント原料として用いた場合は、製造時にCO₂を発生するものの、これは固定されたCO₂であり、石灰石を原料として用いる場合とは異なり、材料としてのCO₂発生はない。論文6は、土壌改良剤としての利用であり、中国の酸性土壌の中和に廃コンクリートを用いることを試みている。

コンクリートの廃棄物として、コンクリースラッジがある。これは生コンクリートが固化する前の廃棄物であり、建設現場から返送される戻りコンクリートや余剰コンクリートのほか、コンクリートミキサー車などを洗浄した後の洗浄水なども含まれる。コンクリートスラッジではセメントの水和反応が進行中であり、その性質は固化も含めて刻々と変化する。このようなコンクリートスラッジのリサイクル、利用法について述べたのが論文3と論文5である。共にコンクリートスラッジに含まれるカルシウム分とCO₂を反応させて炭酸カルシウムの形でCO₂を固定化する方法である。論文3ではセメントと水を混合した模擬コンクリートスラッジを用いているが、論文5では実際のコンクリートポール工場から排出される実コンクリートスラッジを用いている。共に高純度の炭酸カルシウムが得られている。論文5では実際のプラントを建設、事業化しており、炭酸カルシウム（エコタンカル®）と同時に、PAdeCS®（Phosphorus Adsorbent derived from Concrete Sludge）と呼ばれる環境浄化材料も製造している。

以上みてきたように、本特集号はコンクリートのリサイクルに関する研究成果をまとめたものである。研究遂行にあたっては、アジア太平洋研究センターのプロジェクトの補助をいただいた。ここに研究代表者として厚く感謝の意を表したい。また、プロジェクト成果としての叢書出版の代わりにアジア太平洋研究の特集号として研究成果を出版させていただくことを許可いただいた森雄一 成蹊大学学長、高安健将 成蹊大学アジア太平洋研究センター所長（法学部教授）、出版にあたって大変ご尽力いただいた成蹊大学アジア太平洋研究センターポスドクトラルフェロー 鄭 康烈博士、寺西浩研究助成課長に感謝いたします。

引用文献

- 1 <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/guideline.html>
- 2 <https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan02/index.html>
- 3 <https://www.swissinfo.ch/jpn/セメント-環境負荷-co2-気候変動-コンクリート/46463288>
- 4 <https://concrete-mc.jp/cement-share/>
- 5 D. Zhang, Z. Ghouleh, Y. Shao. 2017. "Review on carbonation curing of cement-based materials," *J. CO₂ Utilization*. 21:119-131.
- 6 https://www.energia.co.jp/assets/press/2014/p140801-1a_3.pdf
- 7 <https://japan.aramco.com/ja-jp/making-a-difference/planet-and-people/planet/carbon-capture-utilization-and-storage/carbon-curing>
- 8 <https://www.carboncure.com/>

9 <https://www.solidiatech.com/>

10. D. Ravikumar, D. Zhang, G. Keoleian, S. Miller, V. Sick, V. Li. 2021. "Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit." *Nature Communications* 12, 855:1-13.

関連出版物

1. T. Shimizu, M. Abe, M. Noguchi, A. Yamasaki. 2022. "Removal of Borate Ions from Wastewater Using an Adsorbent Prepared from Waste Concrete (PAdeCS)." *ACS Omega*, in press.
2. S. Tanaka, K. Takahashi, M. Abe, M. Noguchi, A. Yamasaki. 2022. "Preparation of High-Purity Calcium Carbonate by Mineral Carbonation Using Concrete Sludge." *ACS Omega*, Vol. 7, 19600.
3. 野口美由貴、山崎章弘 2021年「バイポーラ膜電気透析法を利用した塩基性廃棄物・鉍物の炭酸塩鉍物化」『化学工学』 Vol. 85:182-184.
4. 飯塚淳、山崎章弘 2021年「コンクリート廃棄物を利用した二酸化炭素の固定と利用」『セッコウ・石灰・セメント・地球環境の科学』 Vol. 28:106-111.
5. S. Tanaka, M. Abe, M. Noguchi, A. Yamasaki. 2021. "Investigation of Mineral Carbonation with Direct Bubbling into Concrete Sludge." *ACS Omega*, Vol. 6:15564-15571.
6. A. Iizuka, T. Sasaki, M. Honma, H. Yoshida, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa, A. Yamasaki. 2017. "Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate." *Chem. Eng. Comm.* Vol. 204:79-85.
7. D. Shuto, K. Igarashi, H. Nagasawa, A. Iizuka, M. Inoue, M. Noguchi, A. Yamasaki. 2015. "CO₂ Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis: Effect of Operation Conditions." *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 54:6569-6577.
8. T. Hongo, Y. Tsunashima, A. Iizuka, A. Yamasaki. 2014. "Synthesis of Anion-Exchange Materials from Concrete Sludge and Evaluation of Their Ability to Remove Harmful Anions (Borate, Fluoride, and Chromate)." *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, Vol. 5:298-302.
9. D. Shuto, H. Nagasawa, A. Iizuka, A. Yamasaki. 2014. "A CO₂ Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis." *RSC Advances*. Vol.4:19778-19788.
10. T. Sasaki, A. Iizuka, M. Watanabe, T. Hongo, A. Yamasaki. 2014. "Preparation and performance of arsenic adsorbents derived from concrete wastes." *Waste Management*, Vol. 34:1829-1835.
11. A. Iizuka, M. Takahashi, E. Shibata, T. Nakamura, A. Yamasaki. 2014. "Boron removal performance of a solid sorbent derived from waste concrete." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.53: 4046-4051.
12. A. Iizuka, A. Yamasaki, Y. Yanagisawa. 2013. "Cost evaluation for a Carbon Dioxide Sequestration Process by Aqueous Mineral Carbonation of Waste Concrete." *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 46(4):326-334.
13. Y. Abe, H. Nagasawa, A. Iizuka, A. Yamasaki, Y. Yanagisawa. 2013. "Aqueous Mineral Carbonation of Alkaline Rocks by a CO₂ Pressure Swing Method." *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 91:933-941.

14. A. Iizuka, K. Hashimoto, H. Nagasawa, K. Kumagai, Y. Yanagisawa, A. Yamasaki. 2012. "Carbon Dioxide Recovery from Carbonate Solutions Using Bipolar Membrane Electrodialysis." *Separation & Purification Technology*, Vol. 101:49-59.
15. A. Iizuka, T. Sasaki, T. Hongo, A. Yamasaki, M. Honma, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa. 2012. "Phosphorus Adsorbent Derived from Concrete Sludge (PAdeCS) and its Phosphorus Recovery Performance." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 51:11266-11273.
16. A. Iizuka, Y. Sakai, A. Yamasaki, M. Honma, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa. 2012. "Bench-Scale Operation of Concrete Sludge Recycling Plant Utilizing Carbon Dioxide." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 51:6099-6104.
17. T. Sasaki, Y. Sakai, T. Hongo, A. Iizuka, A. Yamasaki. 2012. "Preparation of a Solid Adsorbent Derived from Concrete Sludge and its Boron Removal Performance." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 51:5813-5817.
18. Y. Tsunashima, A. Iizuka, J. Akimoto, T. Hongo, A. Yamasaki. 2012. "Preparation of Sorbents from Concrete Sludge Containing Ettringite Phase and Its Performances of Borate and Fluoride Ions Removal from Waste Water." *Chem. Eng. J.* Vol. 200-202:338-343.
19. 本郷照久、五十嵐寛、飯塚淳、山崎章弘 2012年「廃コンクリートからの高強度ジオポリマー硬化体の作製」『環境資源工学』 Vol. 59:137-140.
20. 飯塚淳、本間雅人、吉田浩之、早川康之、山崎章弘、柳沢幸雄 2012年「コンクリートスラッジを利用した二酸化炭素排出量削減プロセス構築のためのカルシウム抽出速度測定」『化学工学論文集』 Vol. 38:129-134.
21. 山崎章弘、長澤寛規、阿部祥信、飯塚淳、柳沢幸雄 2012年「電気透析法を用いた新規な二酸化炭素固定化プロセスの開発」『ケミカルエンジニアリング』 Vol.57:231-236.
22. 飯塚淳、本間雅人、吉田浩之、早川康之、山崎章弘、柳沢幸雄 2012年「コンクリートスラッジを利用した二酸化炭素の再利用技術」『ケミカルエンジニアリング』 Vol. 57:226-230.
23. 佐々木猛、飯塚淳、本間雅人、吉田浩之、早川康之、山崎章弘、柳沢幸雄 2013年「コンクリートスラッジを用いた脱リン材 (PAdeCS) の開発とその脱リン性能」『化学工業』 Vol. 64(1):57-62.
24. 飯塚淳、山崎章弘 2014年「排水からのホウ素・フッ素の除去技術」『ケミカルエンジニアリング』 Vol. 59(1):19-53.
25. Y. Sakai, A. Okada, M. Kato, Wang C. 2018. "Effect of cement fine powder and waste concrete particle on chemical properties of salt-affected soil in China." *Journal of Arid Land Studies*, 28-S: 123-126.

受賞

公益社団法人新化学技術推進協会主催による第19回GSC賞（グリーンサステイナブルケミストリー賞）「奨励賞」受賞 「コンクリートスラッジを利用したCO₂リサイクリングと副生成物の完全利活用」

著書

山崎、野口、2022年、バイポーラ膜電気透析BPEDを利用した二酸化炭素炭酸塩化技術、『二酸化炭素有効利用技術』 NTS 東京

野口、山崎、2022年、バイポーラ膜電気透析BPEDを利用した二酸化炭素の炭酸塩鉱物化技術、『CO₂の分離 回収 貯留技術の開発とプロセス設計』 技術情報協会 東京