

ジオポリマーの技術と展望 —セメントを使わない低CO₂コンクリート—

2022/8

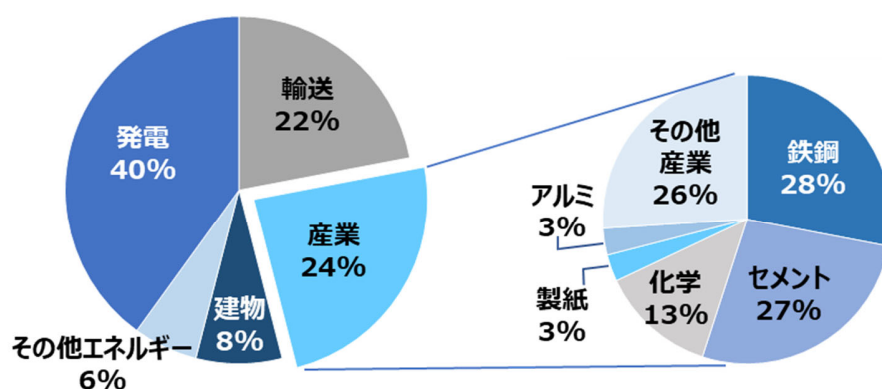
三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室
稲田雄二

Summary

- ジオポリマーはセメントの代替材料であり、セメントと同様にフライアッシュや高炉スラグという産業廃棄物を原料として使いながら、セメントに比べて70%以上ものCO₂排出を削減できることから、その普及が期待されている。
- ジオポリマーは耐熱性や耐酸性、高粘性でセメントより優れた特徴を持つ一方、高コストや実用事例の不足、セメントからの切り替えに対する抵抗感などの課題もある。
- 短期的にはジオポリマーの特徴を活かして厳しい環境下への適用、長期的には一般的な建築物への適用、建築用3Dプリンターとの組み合わせなどによりセメントを代替する用途で導入が進む可能性がある。

セメント産業は、鉄鋼、化学産業と並ぶエネルギー多消費型産業であり、そのCO₂排出量の割合は産業セクターでは鉄鋼に次いで27%、また、世界排出量全体から見ると6.5%を占める（図表1）。そのため、セメントの製造過程でのCO₂排出量をいかに抑えるかが重要な課題となる一方、それを代替する材料の開発も急務となっている。本稿では、脱炭素の観点からセメントの代替材料として近年研究開発が進み、一部実用化もされつつあるジオポリマーに注目し、その技術開発動向と展望について述べる。

図表1 世界の部門別、産業別CO₂排出割合



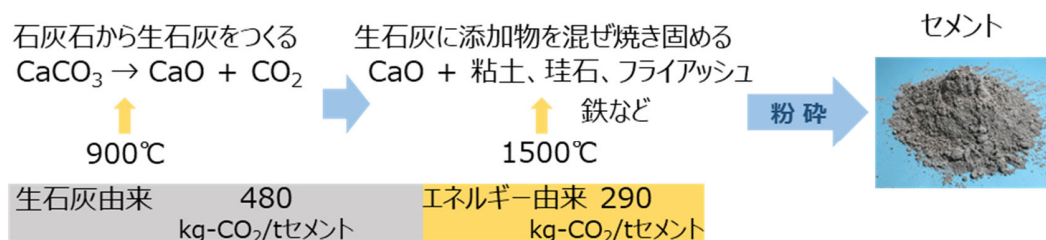
出所：Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 144, July 2021, 「Carbon capture and biomass in industry: A techno-economic analysis and comparison of negative emission options」から三井物産戦略研究所作成

1. ジオポリマーが脱炭素で注目される理由

1-1. セメントの製造工程におけるCO₂排出

セメントは石灰石（CaCO₃）を900℃以上で加熱して生石灰（CaO）に加工し、これに粘土や珪石、石炭灰（フライアッシュ¹）、鉄などを加えた混合物を1,500℃前後に熱して焼き固めた塊を粉末状にしたものである（図表2）。CO₂は、石灰石から生石灰を製造する際の加熱と、添加物を加えて焼き固める際のエネルギー投入により発生する。1トンのセメントを作るのに約770kgのCO₂が排出され、その内訳は生石灰由来で480kg（約60%）、エネルギー由来で290kg（約40%）である。エネルギー由来CO₂は熱源として使用する化石燃料を再生可能エネルギーに変えることで排出を削減できる可能性がある。一方、生石灰由来のCO₂は、生石灰を熱反応で分解することで発生することから、生石灰がセメント原料として使われる限り、その削減は不可能である。この点がセメント製造の脱炭素を根本的に難しくしている。

図表2 セメントの製造工程とCO₂排出量

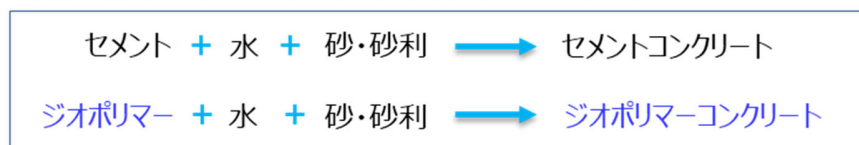


出所：各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

1-2. セメントの代替材料としてのジオポリマーとCO₂排出量比較

セメントに砂や砂利を混ぜてコンクリートが作られるように、ジオポリマーに水、砂や砂利を混ぜればジオポリマーコンクリートを製造することができる（図表3）。この点でジオポリマーはセメントの代替材料といえ、ジオポリマーコンクリートはセメントを使わないコンクリートといえる。

図表3 セメントのコンクリートとジオポリマーコンクリート

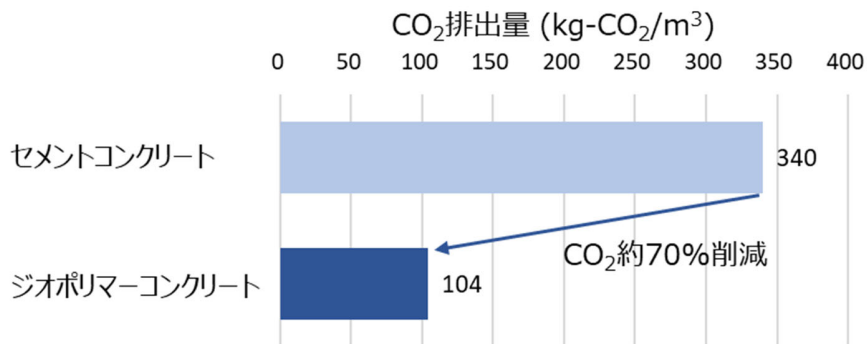


出所：三井物産戦略研究所作成

¹ フライアッシュ（fly ash）は、石炭を燃焼する際に生じる灰。主に石炭火力発電所で排ガスを電気集塵機で処理する際に回収される灰の微粒子。

ジオポリマーの原料や製造方法については後述するが、ジオポリマーはセメントの主原料である生石灰を使わず、900～1,500℃のような高温を必要とする製造工程もない。そのため、ジオポリマーコンクリートの製造工程におけるCO₂排出量はセメントコンクリートより大幅に少なくなる。図表4はセメントコンクリートとジオポリマーコンクリートのCO₂排出量を比較研究した一例²である。

図表4 セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートのCO₂排出量試算結果比較



出所：西松建設技報VOL.39「ジオポリマーの特性と施工事例」から三井物産戦略研究所作成

本研究では、セメントコンクリートが1m³当たり340kgのCO₂を排出するのにに対しジオポリマーコンクリートは104kgのCO₂を排出、約70%のCO₂を削減できることが示されている。他の研究やジオポリマーメーカーの公表値でもセメントコンクリートに比較して70～90%のCO₂を削減するとの報告がある。

2. ジオポリマーとは何か

2-1. ジオポリマーの原料と製造方法

ジオポリマーの原料は図表5に示すように、シリカ、アルミナ成分を含む活性フィラー³と、苛性ソーダ、水ガラスなどのアルカリ溶液である。

図表5 ジオポリマーの原料

活性フィラー		+	アルカリ溶液	
例	構成成分		例	構成成分
フライアッシュ	SiO ₂ 二酸化ケイ素 Al ₂ O ₃ 酸化アルミニウム Fe ₂ O ₃ 、FeO 酸化鉄 CaO 酸化カルシウム MgO 酸化マグネシウム		水酸化ナトリウム NaOH	Na、(H ₂ O)
高炉スラグ			水酸化カリウム KOH	K、(H ₂ O)
メタカオリン			水ガラス Na ₂ SiO ₃	Na、Si、(H ₂ O)
鉱物尾鉱 など			シリカ SiO ₂	Si、(H ₂ O)

出所：各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

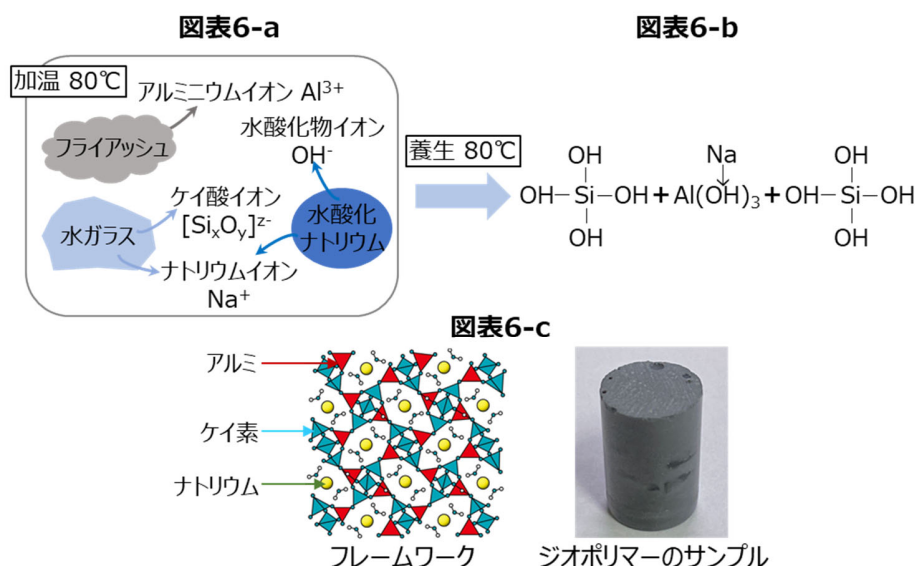
² 西松建設技報VOL39、「ジオポリマーの特性と施工事例」
https://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol39/g039_14.pdf

³ 反応活性を持つ材料。

ジオポリマーには活性フィラーとアルカリ溶液の選択によってさまざまな組み合わせがあり、その反応メカニズムも多様である。ここでは代表的な例としてフライアッシュと水ガラス、水酸化ナトリウムを材料とするジオポリマーを取り上げ、反応の仕組みを紹介する。

フライアッシュにアルカリ溶液の水ガラスと水酸化ナトリウムを加えて高いアルカリ状態にし、80℃に加温すると、フライアッシュからアルミニウムイオン（アルミ）、水ガラスからケイ酸イオン（ケイ素）がそれぞれ溶け出す（図表6-a）。溶け出したアルミとケイ素はイオン状態のため水酸化ナトリウムから分離した水酸化物イオン（OH⁻）と反応し、その状態を養生することで反応が進み、アルミとケイ素の結合体をつくる（図表6-b）。この結合体がジオポリマーであり、アルミとケイ素が結びついた強固なフレームワークとなる（図表6-c）。

図表6 フライアッシュ、水ガラス、水酸化ナトリウムを原料とするジオポリマー



出所：各種公開情報から三井物産戦略研究所作成
 (フレームワークのイラストはコンクリート工学Vol.56「ジオポリマーの現状と今後の展望」
 (https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj/56/5/56_409/_pdf) を参考に作成。
 ジオポリマーのサンプル写真は関西大学 松岡光昭 准教授による提供)

このように、石灰石を加熱する工程でCO₂を排出するセメントと異なり、ジオポリマーを合成する工程ではCO₂は排出されない。また反応を進める養生条件も80℃前後で済み、セメントの900～1,500℃という高温に比べてはるかに低い。これらがセメントに比べて約70%以上のCO₂を削減できる理由である。

なお、ジオポリマーは、1991年にフランスの材料科学者Joseph Davidovitsにより命名され、フライアッシュなどの活性フィラーとアルカリ溶液との反応によって形成されるさまざまな縮重合体（ポリマー）の総称となっている。地球を意味する“ジオ（Geo）”と縮重合体を意味する“ポリマー（Polymer）”を合わせて“ジオポリマー（Geopolymer）”としたのが語源とされる。地球の表面を覆う堆積岩が生成されるメカニズムが、シリカやアルミを結合して生成されるジオポリマーと類似であることからの発想であろう。ちなみに、古代ローマ時代の建築物に利用されたローマンコンクリートはジオポリマーの一種であると考えられている。

2-2. ジオポリマーの利点と課題

図表7にジオポリマーの利点と課題を示す。ジオポリマーは主に耐熱性、耐酸性、物質の固定でセメントよりも優れていることが数々の研究開発により示されている。

図表7 ジオポリマーの利点／可能性と課題

利点／可能性	課題
<ul style="list-style-type: none">・ 耐熱性・ 耐酸性・ 物質の固定・ 高粘性（流動性小）・ CO₂削減・ 産業廃棄物の大量利用	<ul style="list-style-type: none">・ コスト高・ 実用事例の不足・ 高粘性（充填不良）・ セメントからの切り替え抵抗

出所：三井物産戦略研究所作成

耐熱性の高さは優れた耐火材料として、また、高耐酸性は酸による腐食の懸念がある下水道施設などの建設でジオポリマーが有効な可能性がある。物質の固定とは、ジオポリマーがポリマー結合する際に物質を吸着しやすいという特徴をいう。この特徴を活かして有害な重金属や放射性物質をジオポリマー内に閉じ込め、長期間に渡って安全に隔離することが期待されている。高粘性は流動性を抑えた材料が求められる3Dプリンター向けの材料として、建築に限らず広く造形物の製作に活用できる。さらに、フライアッシュのような産業廃棄物を原料とすることから、資源の有効活用も可能である。

一方の課題としては、セメントに比べ現状数割ほどコストが高いとされ、開発途上の材料であることから実績が少ないことがある。上述のとおり原料の一部は産業廃棄物を利用できるが、アルカリ溶液や水ガラスが高コストの要因となる。今後の研究開発でそれら高コスト要因となる原料使用量を低減することや安価な原料への代替を検討することが期待される。高粘性は利点でも取り上げたが、充填する際には抵抗となるため課題でもある。また、セメントという実績ある既存技術から、新しいジオポリマーを採用することへの社会的な抵抗感もあり、この抵抗感を少なくするためにはジオポリマーのコスト低減化やその利点が広く社会に認知されることが重要である。

3. ジオポリマーの開発事例

ジオポリマーは図表8に示すように、建築資材メーカーやゼネコン、大学等研究機関により開発、商品化が進められている。

国内では、EeTAFCON（イータフコン）研究会、西松建設などのグループがマンホールやブロックをジオポリマーで製造している。マンホールやブロックは、工場であらかじめ製造し、建設現場へ輸送して現地で組み立てる規格化されたコンクリート製品であり、「プレキャストコンクリート」と呼ばれている。プレキャストコンクリートは、天候などの環境に左右される現場施工とは異なり、工場生産により品質の維

持や安全管理の徹底が可能のため、開発段階のジオポリマーに適していると考えられる。一方、大林組、ポゾリス ソリューションズなどは現場施工への適用性を高めるため、コンクリートポンプで圧送可能なジオポリマーを開発した。このジオポリマーコンクリートは耐熱性が求められる製鉄所の擁壁（重量物を支える壁）の補修工事に採用されている。

図表8 ジオポリマーの開発事例

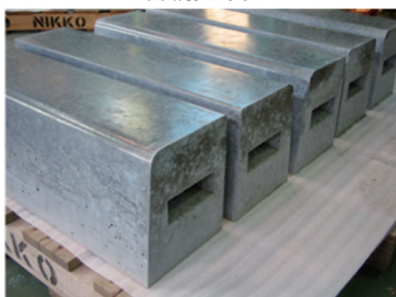
研究機関、企業	開発概要
(日本) EeTAFCON研究会 (中川ヒューム管工業、電力中央研究所、昭和コンクリート工業 ほか)	フライアッシュ、高炉スラグを原料に水ガラスを使わずアルカリ溶液だけで製造できるジオポリマーを開発、下水道マンホールや道路側溝蓋などのプレキャスト品を実用化
(日本) 西松建設、共和コンクリート工業、JFEスチール、東北大学、日本大学	ジオポリマー製のブロックを開発するなど10年以上にわたる研究開発実績を基に、寒冷地でも施工可能で耐凍害性を持つジオポリマーを開発中
(日本) 大林組、ポゾリス ソリューションズ、日本製鉄	フライアッシュ、高炉スラグを原料にコンクリートポンプ車で圧送可能なジオポリマーを開発し日本製鉄構内の擁壁（ようへき）補修工事に適用
(フィンランド) Betolar	ジオポリマー製舗装ブロックや導管材を製造販売（商品名Geoprime [®] ）、原料はフライアッシュなど産業副産物が95%を占め、セメントに比べCO ₂ を80%削減
(豪州) Wagners、Hassel Architect、Queensland大学	フライアッシュと高炉スラグを原料とするジオポリマー（商品名Earth Frindly Concrete [®] ）を開発、世界で初めて建物の構造材として採用された
(ロシア) RENCA	ジオポリマーを建築用3Dプリンターに適用、可搬式3Dプリンターでジオポリマーの現場施工を可能とする技術を開発

EeTAFCON研究会
下水道マンホール



<https://www.eetafcon.com/>

西松建設 ほか
外構ブロック



https://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol35/g035_23.pdf

大林組 ほか
擁壁補修工事



https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news/20210330_1.html

Wagners ほか
Queensland大学施設のフロア材



<http://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>

RENCA
可搬式3Dプリンターによる現場施工



<https://www.youtube.com/watch?v=EXoslZaYWG1>

出所：各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

海外ではフィンランドのBetolarがジオポリマー製の舗装ブロックなどを商品化し販売しているほか、豪州ではWagnersなどがQueensland大学構内の4階建てビルにジオポリマー製の床材パネルを適用し、建築物の構造材としてジオポリマーが初めて採用された事例となっている。ロシアのRENCAは、ジオポリマーの特徴である高い粘性を活用し、建築用3Dプリンターの材料にジオポリマーを採用した。同社は可搬式の3Dプリンターを開発し、現場での施工を重視した建築向けジオポリマーに注力している。3Dプリンターによって従来の型枠によるセメントコンクリート施工に比べ作業効率が向上する上、脱炭素も図れることから、ジオポリマーと3Dプリンターの組み合わせは今後注目される可能性がある。

4. ジオポリマーの展望

ジオポリマーは、セメントと同様にフライアッシュや高炉スラグという産業廃棄物を原料として使いながら、セメントに比べて70%以上ものCO₂排出を削減できる。脱炭素の流れを背景に今後、短期的にはジオポリマーの耐酸性、耐熱性に優れる点を活かした工場製造によるプレキャスト製品が、例えば酸性下での耐久性が課題となる下水施設や、耐熱性が求められる防火壁などで採用されるだろう。長期的には、一般的な建築物へのプレキャストパネルなどの適用、また、従来のセメントコンクリートのように現場施工が容易なジオポリマーや3Dプリンターとの組み合わせなど、新しい取り組みがセメントコンクリートの代替を進めていくと考えられる。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。