

脱炭素に向けた取り組み

広島工業大学 工学部 建築工学科・教授
坂本 英輔

2023年2月15日 場所: 広島工業大学広島校舎501号室

1992年に採択された**国連気候変動枠組条約**に基づき、1995年より毎年、国連気候変動枠組条約締約国会議(COP)が開催され、**世界での温室効果ガス排出量削減の実現に向けて議論**が行われてきた。

☞日本では

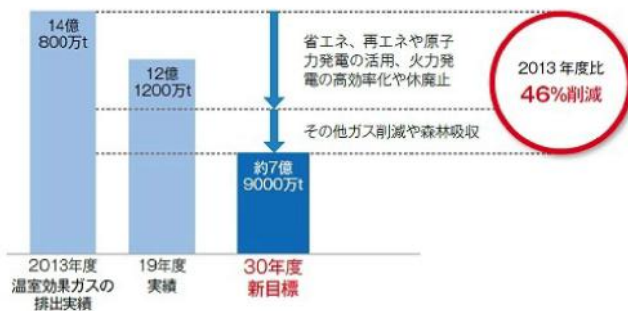
- 2016年11月に発効した「パリ協定」において、温室効果ガス削減目標として、**2030年度までに2013年度比で26%削減**するという目標を掲げる。
- 2020年10月:菅前総理の所信表明演説において、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「**2050年カーボンニュートラル**」に挑戦し、**脱炭素社会の実現を目指す**ことを宣言した。

脱炭素の流れ

2

•2021年4月:2030年度の排出量を**2013年度比で46%削減**すると発表した。

■ 2030年に向けて大幅削減が必要になる



<https://project.nikkeibp.co.jp/ESG/atcl/column/00005/042600071/>

脱炭素の流れ

3

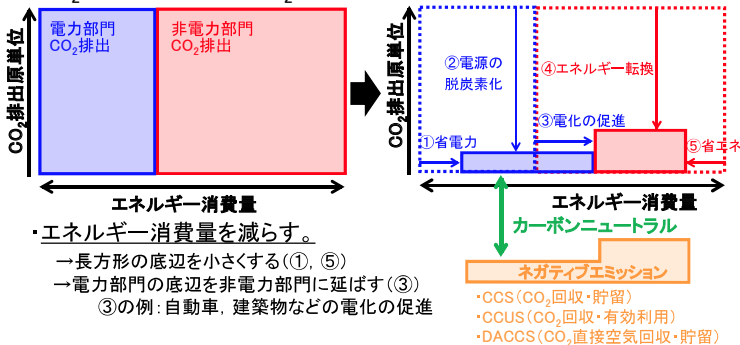
	日本	EU	英国	米国	中国
2020				2021年1月パリ協定復帰を決定	
2030	2013年度比で46%減、さらに50%の高みに向けて挑戦(温対会議・気候サミットにて総理表明)	1990年比で少なくとも55%減(NDC)	1990年比で少なくとも68%減(NDC)	2005年比で50~52%減(NDC)	2030年までにCO2排出を減少に転換(国連演説)
2040					
2050	カーボンニュートラル(法定化)	カーボンニュートラル(長期戦略)	カーボンニュートラル(法定化)	カーボンニュートラル(大統領公約)	
2060					カーボンニュートラル(国連演説)

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-2.html>

カーボンニュートラル

4

CO_2 排出量 = 面積 (CO_2 排出原単位 × エネルギー消費量)



•エネルギー消費量を減らす。

- 長方形の底辺を小さくする(①, ⑤)
- 電力部門の底辺を非電力部門に延ばす(③)
- ③の例:自動車, 建築物などの電化の促進

•エネルギーあたりの CO_2 排出原単位を小さくする。

- 長方形の高さ部分を低くする(②, ④)
- ②の例:再生可能エネルギーの利用
- ④の例:熱利用のため水素, アンモニア, バイオマス燃料など

経済産業省:250年カーボンニュートラルに向けたグリーンイノベーションの方向性

脱炭素とカーボンニュートラル

5

☞脱炭素

- 地球温暖化の最たる原因である **CO_2 排出量をゼロ**に抑えること。

☞カーボンニュートラル

- 排出される CO_2 をはじめとした**温室効果ガスを削減**すること。
- 脱炭素のように CO_2 排出量ゼロにするのではなく、吸収分と相殺することによって**実質的に排出量がゼロ**になるような取り組みのこと。

<https://www.libcon.co.jp/column/difference-between-decarbonization-and-carbon-neutrality/>

・2021年6月:

- 改正地球温暖化対策推進法(温対法)を交付
2050年カーボンニュートラル実現を明記
都道府県などに再エネ利用の実施目標の設定を義務付け

→地域脱炭素ロードマップを公表

30年度までに少なくとも100カ所の「脱炭素先行地域」を創出

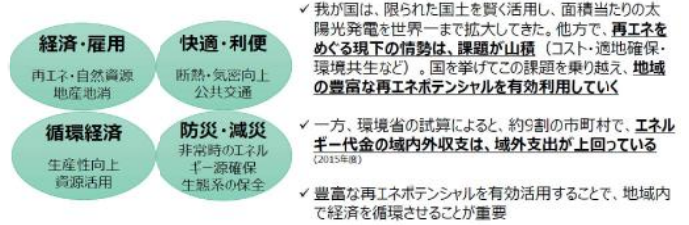
→「グリーン成長戦略」の改訂版を公表

成長が期待される14分野(産業)の取り組みを列挙

1. 地域脱炭素ロードマップのキーメッセージ
～地方からはじまる、次の時代への移行戦略～

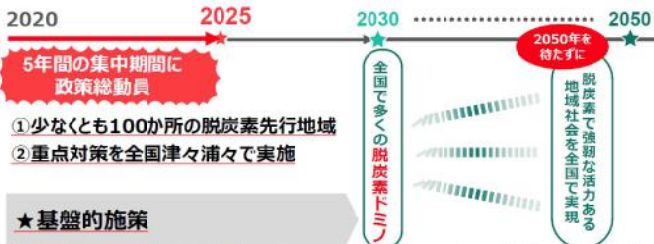
地域脱炭素は、地域課題を解決し、地域の魅力と質を向上させる地方創生に貢献

- ① 一人一人が主体となって、**今ある技術**で取り組める
- ② **再エネなどの地域資源を最大限**に活用することで実現できる
- ③ 地域の経済活性化、**地域課題の解決に貢献**できる



2. 地域脱炭素ロードマップ 対策・施策の全体像

- **今後の5年間に**政策を総動員し、人材・技術・情報・資金を積極支援
 - ① 2030年度までに少なくとも**100カ所**の「脱炭素先行地域」をつくる
 - ② 全国で、重点対策を**実行**（自家消費型太陽光、省エネ住宅、電動車など）
- 3つの基盤的施策（①継続的・包括的支援、②ライフスタイルバージョン、③制度改革）を実施
- モデルを全国に広げ、2050年を待たずに脱炭素達成（**脱炭素トミ**）



「みどりの食料システム戦略」「国土交通グリーンチャレンジ」「2050カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」等の政策プログラムと連携して実施する

3-2. 脱炭素の基盤となる重点対策の全国実施

- 全国津々浦々で取り組む**脱炭素の基盤となる重点対策**を整理
 - 国はガイドライン策定や積極的支援メカニズムにより**協力**
- ① 屋根置きなど**自家消費型の太陽光発電**
 - ② **地域共生・地域裨益型再エネ**の立地
 - ③ 公共施設など業務ビル等における徹底した**省エネと再エネ電気調達**と更新や改修時の**ZEB化誘導**
 - ④ **住宅・建築物の省エネ性能**等の向上
 - ⑤ **ゼロカーボンドライブ**（再エネ電気×EV/PHEV/FCV）
 - ⑥ 資源循環の高度化を通じた**循環経済への移行**
 - ⑦ コンパクト・グラス・ネットワーク等による**脱炭素型まちづくり**
 - ⑧ 食料・農林水産業の**生産力向上と持続性の両立**

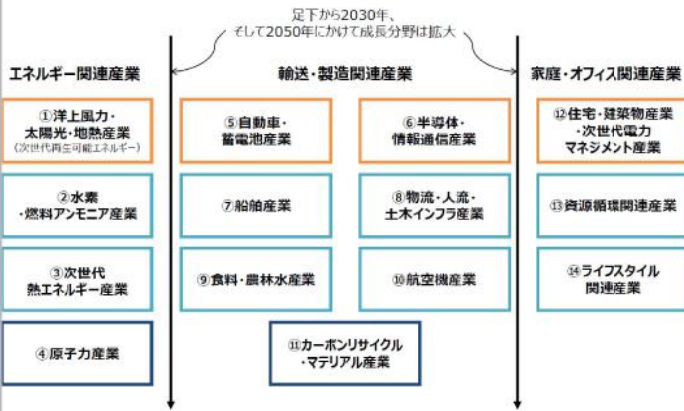
(参考)別添3 地域脱炭素の取組に対する関係省庁の主な支援ツール・枠組み

関係省庁	支援ツール・枠組み(名称)
環境省	地方公共団体実行計画(地方公共団体実行計画策定・管理等支援システム[LAPSS(ラプス)])、再生可能エネルギー情報提供システム[REPOS(リーポス)]、環境アセスメントデータベース[EADAS(イーダス)]、地域経済循環分析、環境省ローカルSDGs-地域循環共生圏づくりプラットフォーム、地域エネルギー温暖化対策推進会議、気候変動適応情報プラットフォーム
総務省	分散型エネルギーインフラプロジェクト、ローカル10,000プロジェクト、地域力創造アドバイザー
内閣府	SDGs未来都市、地方創生推進交付金、地方創生テレワーク交付金、企業版ふるさと納税、地方創生人材支援制度、地方創生SDGs官民連携プラットフォーム、PPP/PMI地域プラットフォーム、スマートシティ官民連携プラットフォーム
農林水産省	バイオマス産業都市、豊山漁村再エネ法基本計画、畜産バイオマス地産地消対策事業、地域資源活用展開支援事業、脱炭素型フードサプライチェーン可視化(見える化)推進事業
経済産業省	ミラサplus、省エネルギー相談地域プラットフォーム構築事業、地域エネルギー温暖化対策推進会議(再掲)、なつく!再生可能エネルギー
国土交通省	コンパクトシティ形成支援チーム、ウォーカー推進制度、地域公共交通確保維持改善事業、グリーンインフラ官民連携プラットフォーム、国土交通省スマートシティモデルプロジェクト、観光地域づくり法人(DMO)
文部科学省	地域の脱炭素化のための基盤的研究開発、カーボンニュートラル達成に貢献する大学等コアリジョン、エコスクール・プラス

1(1). 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

- 2020年10月、日本は、「**2050年カーボンニュートラル**」を宣言した。
- 温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとする時代は終わり、国際的にも、**成長の機会と捉える時代**に突入。
→ 従来の発想を転換し、積極的に対策を行うことが、産業構造や社会経済の変革をもたらす、次なる大きな成長に繋がっていく。こうした「**経済と環境の好循環**」を作っていく**産業政策 = グリーン成長戦略**。
- 「発想の転換」、「変革」といった言葉を並べるのは簡単だが、**実行するのは、並大抵の努力ではできない**。
➢ 産業界には、**これまでのビジネスモデルや戦略を根本的に変えていく必要がある企業**が数多く存在。
→ **新しい時代をリードしていくチャンス**の中、大胆な投資をし、イノベーションを起こすといった**民間企業の前向きな挑戦を、全力で応援 = 政府の役割**。
- 国として、可能な限り**具体的な見通し**を示し、**高い目標**を掲げて、**民間企業が挑戦しやすい環境**を作る必要。
→ **産業政策の観点から、成長が期待される分野・産業を見いだすためにも、まずは、2050年カーボンニュートラルを実現するためのエネルギー政策及びエネルギー需給の給姿を示す**が必要。
→ こうして導き出された**成長が期待される産業(14分野)**において、**高い目標を設定し、あらゆる政策を総動員**。

5 (1) . 成長が期待される14分野



出典: 経済産業省・2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略P.23

①カーボンリサイクル・マテリアル産業 (カーボンリサイクル)

<p>◆カーボンリサイクルは、CO₂を資源として有効活用する技術でカーボンニュートラル社会実現に重要。日本に競争力があり、コスト削減、社会実装を進め、グローバル展開を目指す。(IEAは、2070年のCCUSによるCO₂削減量は世界約69億トン/年と予測。)</p>	
<p>現状と課題</p> <p>CO₂を回収して造るコンクリートは実用化されたが、市場が限定的</p> <ul style="list-style-type: none"> 現状のCO₂-SUICOMはコスト高。(=炭素コンクリートの約3倍の100円/kg) CO₂回収量が限定的。コンクリートの中の炭素が貯められる(CO₂回収による脱炭素化によるため)。課題は、 <p>石炭石の燃焼時にCO₂が発生、しかし大量のCO₂回収技術が未確立</p> <ul style="list-style-type: none"> モルタルから1日当たり数トンにCO₂が貯蔵。炭化技術(化学吸収)でコスト削減化。 炭酸化技術でCO₂利用量が少なく、実用化も限定的。 	<p>今後の取組</p> <p>公共調達を活用し販路拡大・コスト低減</p> <ul style="list-style-type: none"> コスト目標として、2030年に、需要拡大を測りて炭素コンクリートはCO₂削減(=30円/kg)を目指す。2050年に、炭素削減とCO₂削減を両立してCO₂削減率を向上させる。 市場規模は、2030年時点で、世界で約15~40兆円と見込。 公共調達による販路拡大 新技術に関する国交省・国土省 (NETIS) にCO₂回収型コンクリート登録。国・地方自治体による公共調達拡大。2025年日本国土交通省で導入を検討。また、国際標準化を推進し、アジアの展開を図る。 多様な所産拡大 品質性能維持・新製品開発、建築やコンクリート・ブロックに用途拡大、標準化促進に向けた取組による民間部門での需要拡大を検討。 CO₂回収量の増大とコスト削減を両立させた新技術・製品の開発と知識網を通じたライフサイクル全体の活用によるシナジー獲得・拡大。 <p>新たな製造プロセスの確立・炭素性の利用拡大</p> <ul style="list-style-type: none"> 2030年までに、石炭石からの排出CO₂を100%回収する技術の確立を目指す。産業物等を用いた炭素回収やカーボンリサイクル技術も確立し、炭素性の利用拡大を図る。 2050年までに、国内工場への導入や海外アジア等のアフリカの活用も、カーボンリサイクルセメントの普及拡大を目指す。

出典: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略P.73

・2021年7月:

→国土交通省「グリーンチャレンジ」を公表
30年度までに取り組む6つの重点プロジェクトを列挙

→新たな地球温暖化対策計画を閣議決定
改正温対法に基づいて政府の総合計画を見直し

→新たなエネルギー基本計画を閣議決定
30年度の電源構成で再エネの比率を19年度比で倍増

日経コンストラクション、2022年1月10日

グリーン社会の実現に向けて、分野横断・官民連携の視点から重点的に取り組むべきプロジェクトを掲げている。

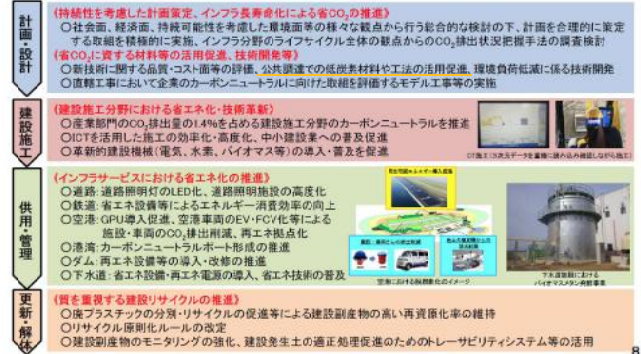
グリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」の概要



出典: 国土交通省「グリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」」P.1

インフラのライフサイクル全体でのカーボンニュートラル、循環型社会の実現

○一旦整備されると長期間にわたって供用されるインフラ分野において、供用・管理段階でのインフラサービスにおける省エネのみならず、ライフサイクル全体の観点から、計画・設計・建設施工・更新・解体等の段階において、脱炭素化の取組を推進する。また、循環型社会の形成に向けて、建設リサイクル推進計画2020に基づき、質を重視した建設リサイクルを推進する。



出典: 国土交通省「グリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」」P.8

「2050年カーボンニュートラル」に向けてエネルギー・産業部門の構造転換や、大胆な投資によるイノベーションといった現行の取組を大幅に加速するため、NEDOに2兆円の基金を造成し、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援する基金制度。



出典: 経済産業省HP

セメント・コンクリートにおけるCO₂排出

24

コンクリートは、世界全体において、水に次いで使用量の多い物資である。

☞日本では

- ・セメントの年間生産量は1996年に1億トンを超えてピークに減少傾向をたどり、最近では60%程度
- ・セメント1tの生産で763kg-CO₂排出
- ・セメント産業は、電力、鉄鋼についてCO₂排出量が多い(総排出量の約5%)
- ・コンクリート1m³あたりのCO₂排出量は約300kg-CO₂(原材料でセメントが最大で約236kg-CO₂)

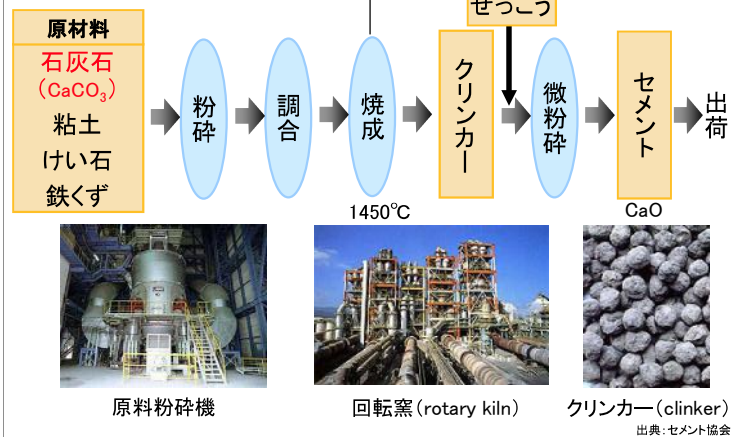
コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.730-736, 2021

セメント・コンクリートにおけるCO₂排出

25

☞製造工程

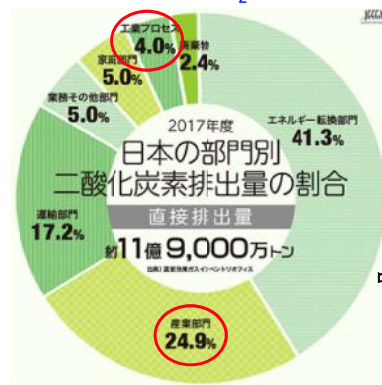
(緩結材:凝結時間を遅らせる)



セメント産業のCO₂排出量

26

☞セメント産業のCO₂排出量:約5%(電力、鉄鋼について第3位)



- ・工業プロセスの大部分:石灰石CaCO₃の脱炭酸
- ・産業部門の一部:セメント製造に用いる化石系エネルギーの使用

☞省エネルギー化に努めるとともに、他産業の廃棄物(廃タイヤ、石灰灰など)の受け入れ

出所: 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス
「日本の1990-2017年度の温室効果ガス排出量データ」(2019.4.16発表)
引用: 全国地球温暖化防止活動推進センター(<http://www.jccca.org/>)

木材とカーボンニュートラル

27

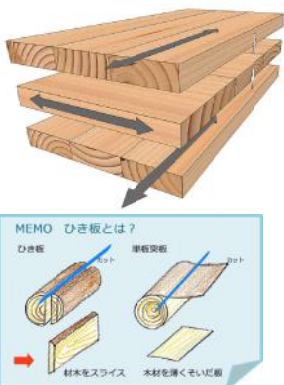
・2010年「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」



直交集成板 (cross laminated timber, CLT)

28

ラミナを繊維方向が互いに平行になるように接着したものを、繊維方向が直交するように積層接着し、3層以上の構造を持たせた材料

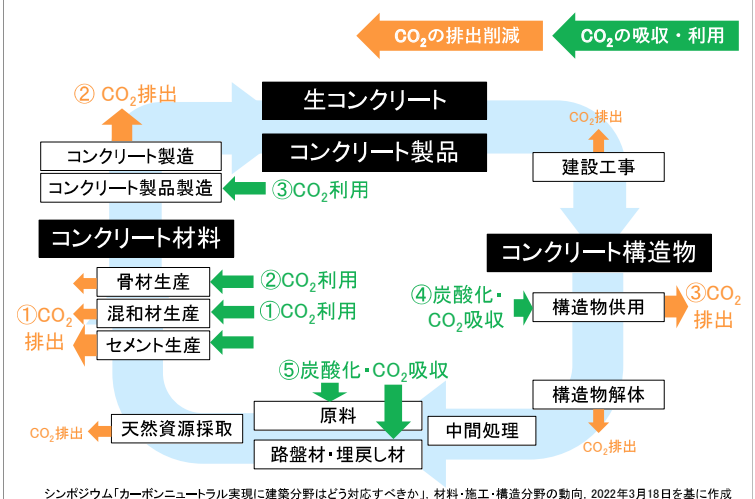


<http://clta.jp/clt/>

<https://www.zaiso-house.co.jp/orderhouse/zaisotimes/2155.html>

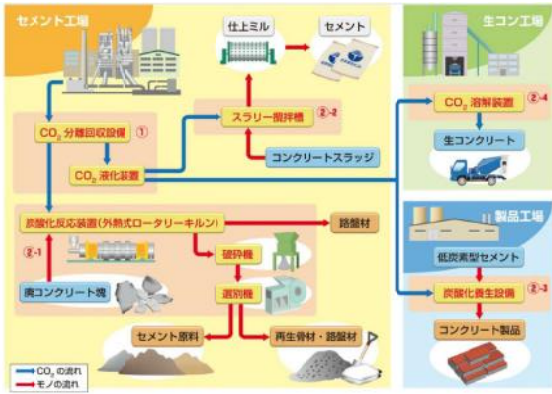
セメント・コンクリートのLCCO₂

29



①セメント製造時のCO₂排出削減

製造プロセスにおけるCO₂回収・有効利用技術 (太平洋セメント)



<https://igaspedia.com/2022/03/11/tr-sanso-taiheiy-cement-co2-liquefaction/>

①セメント製造時のCO₂排出削減

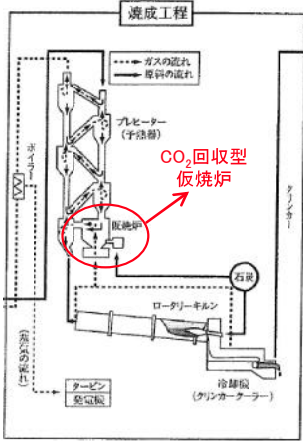
セメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収 (図①)



【方法1】アミン液とよばれる化学吸収剤によるCO₂吸収工程と、そのアミン液を加熱してCO₂を放出させる工程の繰り返しにより純度の高いCO₂を回収。(熊谷工場で2020~2021年度のNEDOの実証事業として実施)

<https://igaspedia.com/2022/03/11/tr-sanso-taiheiy-cement-co2-liquefaction/>

①セメント製造時のCO₂排出削減



【方法2】原料由来のCO₂のほとんどは、プレヒーター内にある仮焼炉とよばれる加熱炉内で発生する。プレヒーターから効率よくCO₂を分離回収するCO₂回収型セメント製造プロセス(C2SPキルン)の開発。

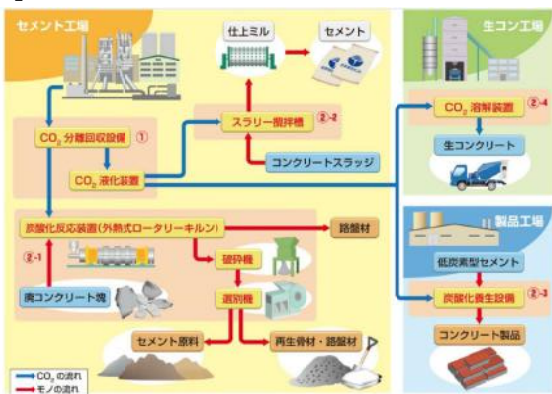
セメントの製造工程 (出典:コンクリート技術の要点)

①セメント製造時のCO₂排出削減

- 回収したCO₂を合成メタンに転換してエネルギーとして再利用(メタネーション)
- 鉱化剤の添加やクリンカ組成の間隙相の増量による焼成温度の低減
- ポルトランドセメントに添加する少量混合成分の増量

①セメント製造時のCO₂排出削減

- セメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収 (図①)
- CO₂有効利用技術 (図②-1~4)

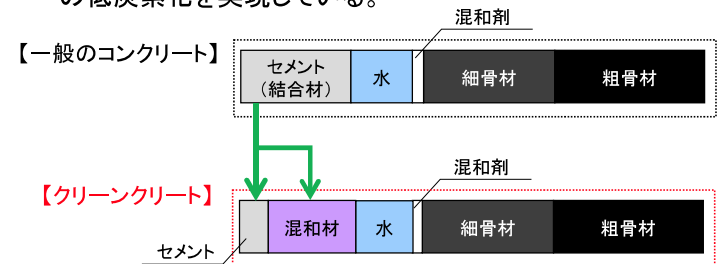


<https://igaspedia.com/2022/03/11/tr-sanso-taiheiy-cement-co2-liquefaction/>

②コンクリート製造時のCO₂排出削減

クリーンクリート(大林組)

セメント(763kg-CO₂/t)を高炉スラグ微粉末(24.1kg-CO₂/t)などの混和材に大量置換することで、コンクリートの低炭素化を実現している。



→CO₂排出量を約60~80%削減可能。

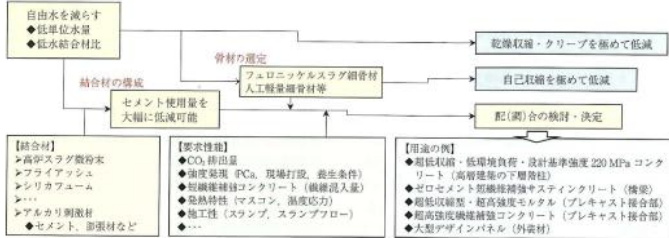
https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/079/2015_079_22.pdf

②コンクリート製造時のCO₂排出削減

36

☞サスティンクリート(三井住友建設)

- セメントを使わない高強度かつ超低収縮・低発熱なコンクリート。
- 膨張材によるカルシウムイオンの供給とアルカリ刺激とで副産物(高炉スラグ微粉末, シリカフェーム, フライアッシュ)が反応することによって硬化する。



→STC-ZEROはCO₂排出量を約70%削減可能。

コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.788-793, 2021

②コンクリート製造時のCO₂排出削減

37

☞スラグ固化体(奥村組土木興業・スペースK)

- 産業副産物である鉄鋼スラグを骨材や結合材に用い、セメントを使わずにコンクリートと同等の強度が得られる。
- 海水中の塩化物イオンが早強性に、硫酸イオンが強度増進に効く。



→CO₂排出量を99%削減可能。

https://www.jfe-mineral.co.jp/business/iron_and_steel/blast_furnace_slag_fine_aggregate.html

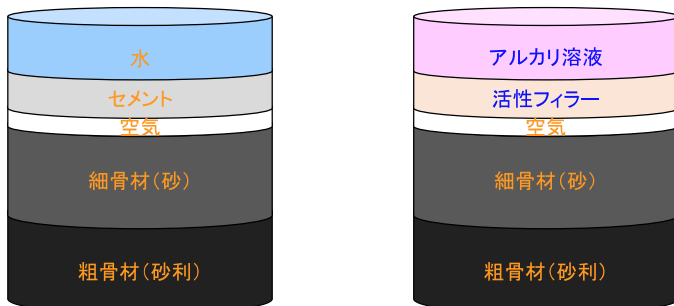
<https://www.slg.jp/slag/product/kotuzai.html>

②コンクリート製造時のCO₂排出削減

38

☞ジオポリマーコンクリート

- セメントの代わりに**活性フィラー**, 水の代わりに**アルカリ溶液**を混ぜて作るコンクリート。
- 圧縮強度は、セメントコンクリートと同レベルまで発現が可能(セメント)コンクリート



②コンクリート製造時のCO₂排出削減

39

- 産業副産物の有効利用が図れる。
- 固化成分にCaが少ないため、**酸に対する抵抗性**が高い。
- アルカリシリカ反応**が発生しにくい。

→セメントに比べ、CO₂を約70%削減できる。



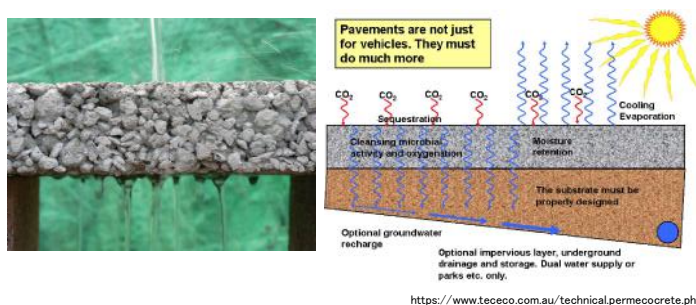
<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd49/rd4910/rd49100114.html>

③構造物供用時のCO₂排出削減

40

☞Permeconcrete

- 連続空隙を持った雷おこしのような形態をしたコンクリートであり、必要に応じて地下排水を設け、通常は貯水池に水を貯めることができる舗装(**ヒートアイランド現象抑制**)。
- 大規模な炭酸塩岩の吸収源となる。



<https://www.tececo.com.au/technical/permeconcrete.php>

①混和材製造時のCO₂利用

41

☞カーボンリサイクルコンクリート(大成建設)

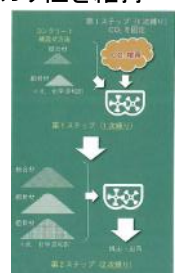
- CO₂を回収して製造される炭酸カルシウム(CCU製品: Carbon dioxide Capture and Utilization)と高炉スラグ主体とした結合材を用いて製造
- CO₂をガスとして取り込まないので強アルカリ性を維持

通常のコンクリート	235
Carbon-Recycle	▲171 55
	← 吸収したCO ₂ 量 排出したCO ₂ 量 →

コンクリート製造時のCO₂排出量の収支 単位(kg/m³)

→コンクリート1m³当たりのCO₂固定量は70~170kg-CO₂(カーボンネガティブ可能)

<https://www.taisei.co.jp/t-econcrete/>



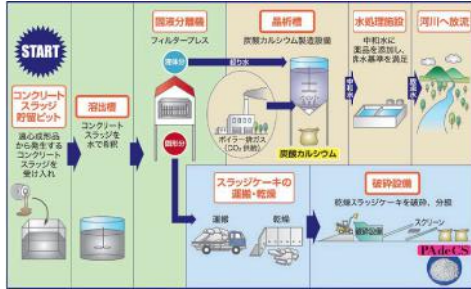
T-Carbon Mixing (CO₂固定量10kg/m³)

①混和材製造時のCO₂利用

42

⇒エコタンカル(日本コンクリート工業)

- ・コンクリート二次製品工場内で発生するスラッジから固液分離した高アルカリ廃水にボイラー排ガス中のCO₂を反応させることにより、軽質炭酸カルシウムを製造



→軽質炭酸カルシウムのCO₂固定量は440kg-CO₂/t

出典:エコタンカル リーフレット

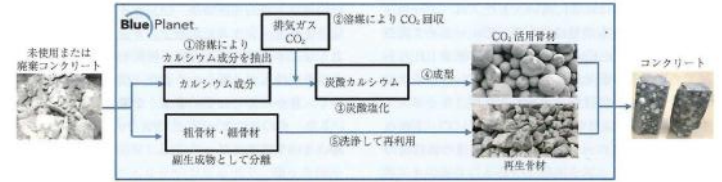
②骨材製造時のCO₂利用

43

カーボンリサイクル技術におけるMineralization:カルシウムとCO₂を反応させて炭酸カルシウムを生成

⇒Blue Planet Systems Corporation(アメリカ)

- ・炭酸カルシウムを軽量骨材としてサイズと強度を制御可能
- ・発電所からの排ガスを最低限の処理で使用可能
- ・常温常圧化のプロセス



→最大で軽量骨材1t当たり440kgのCO₂を吸収

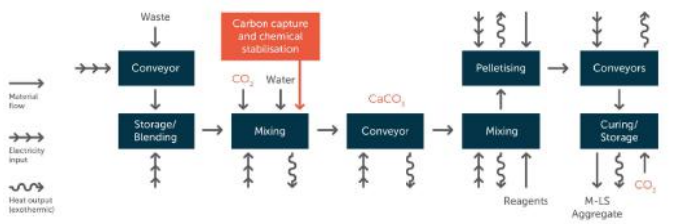
コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.788-793, 2021

②骨材製造時のCO₂利用

44

⇒O.C.O. Technology(イギリス)

- ・焼却灰, 石炭灰, スラッグなどの中のカルシウムとCO₂を反応させて炭酸カルシウムを含む骨材を製造
- ・英国内に3工場を保有し, 年間20万t以上の骨材を製造中



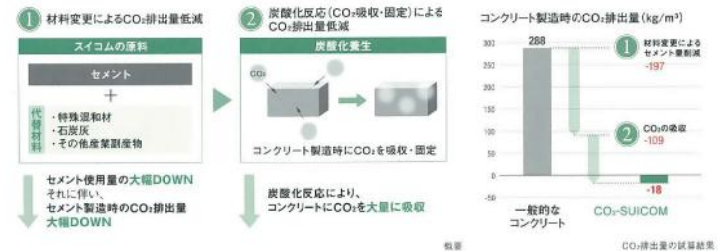
<https://oco.co.uk>

③コンクリート製造時のCO₂利用

45

⇒CO₂-SUICOM(鹿島建設, デンカ, ランデス, 中国電力)

- ・セメントの半分を以上を高炉スラッグなどに置換し, 消石灰を原料としたCO₂と反応して硬化する特殊混和材「γ-C₂S」でCO₂を吸収



CO₂排出量がゼロ以下=コンクリート中に吸収したCO₂量>コンクリートを製造した際に排出されたCO₂量

<https://www.landes.co.jp/product/113>

③コンクリート製造時のCO₂利用

46

⇒カーボンキュア社の技術(カーボンキュア・テクノロジーズ)

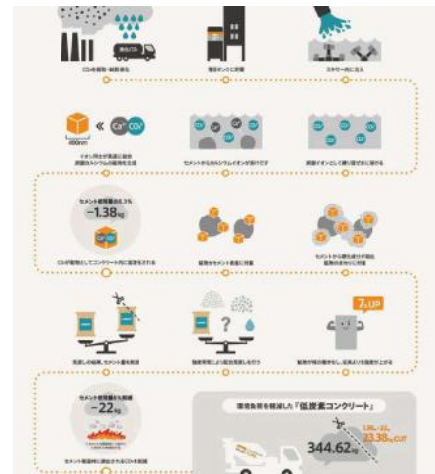
カーボンキュア・テクノロジーズは, 2007年にRob Niven(ロブ・ニーブン)らが設立したカナダのブリティッシュコロンビア州に本部を置く環境テクノロジー企業(三菱商事が同社に投資)。



<https://www.atpress.ne.jp/news/250082>

③コンクリート製造時のCO₂利用

47



<https://kyodonevspwrire.jp/release/202111123277>

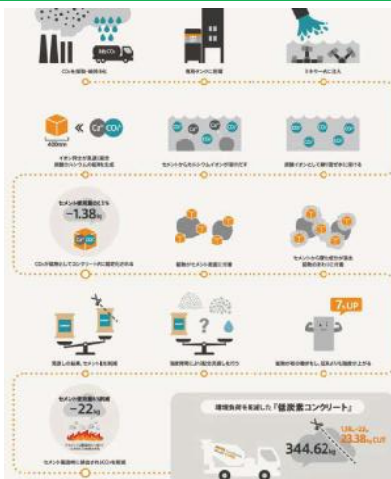
③コンクリート製造時のCO₂利用

48

CO₂サプライヤーは、化学工場などから採取したCO₂を純粋液化し、ローリー車で生コンプラントに設置された専用タンクまで配送する。



カーボンキュア社は、専用タンクからCO₂を取り込んで最適な添加量をプラントのミキサー内部に直接注入する装置をプラントに供与する。



<https://kyodonewsprwire.jp/release/202111123277>

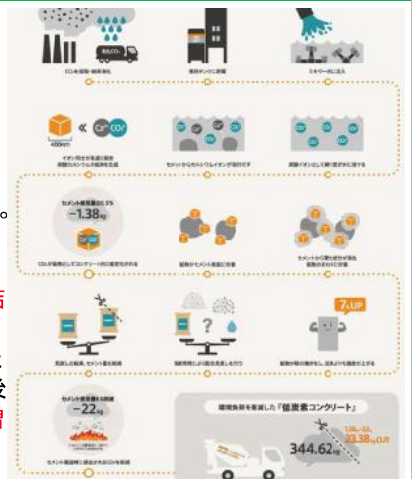
③コンクリート製造時のCO₂利用

49

プラントでセメント、骨材、水などが計量され、ミキサーに投入された直後、ミキサー内部に直接注入されたCO₂は空気に触れた瞬間に「CO₂スノー」と呼ばれる粒子となって水に溶け込んで炭酸水となる。



CO₂と水酸化カルシウムと結合して、400nmの炭酸カルシウム結晶を形成し、この注入したCO₂の「鉱物化」により、硬化後のコンクリートの圧縮強度が増加する。



<https://kyodonewsprwire.jp/release/202111123277>

③コンクリート製造時のCO₂利用

50

セメント使用量を戦略的に減らしても要求される強度を満たす。

コンクリート1m³あたりのCO₂削減効果: 約18kg

- ① CO₂の注入による効果 → 1m³あたり290g
- ② セメント使用量削減による効果

CC社技術におけるコンクリート1m³あたりのCO₂フットプリント

Factor	g CO ₂ /m ³ concrete
Emissions - CO ₂ from gas processing	49.4
Emissions - CO ₂ from gas transport	6.1
Emissions - CO ₂ from equipment production	0.1
Emissions - CO ₂ from equipment transport	0.0
Emissions - CO ₂ from equipment operation	9.2
Emissions - Avoided CO ₂ from materials transport	-123.6
CO2AB : CO ₂ absorbed	-289.1
CO2AV : Avoided CO ₂ emissions from cement	-17584.8
Total CO ₂ avoided and absorbed	-17997.4
CO2EM : Total CO ₂ produced	64.7
Net CO ₂ reduction	-17932.7

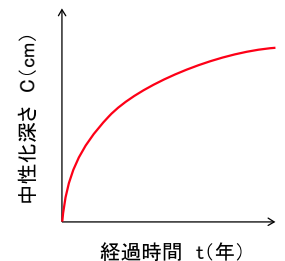
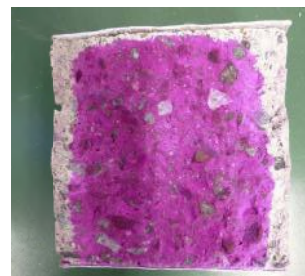
出典: コンクリート工学, Vol.59, No.9, 2021年9月号

④構造物供用時のCO₂吸収

51

☞コンクリートの中性化(炭酸化)

- ・コンクリート構造物のコンクリートは大気中の二酸化炭素などと徐々に反応して炭酸カルシウム(CaCO₃)として固定化(吸収)する。
- ・供用段階のCO₂吸収量はセメントの脱炭酸由来のCO₂排出量の約20%

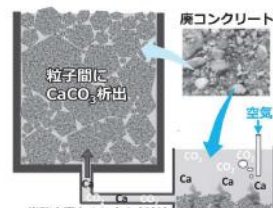
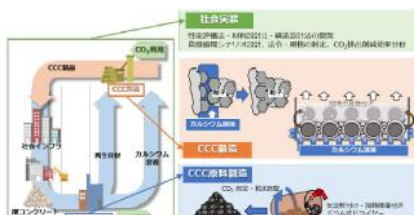


⑤コンクリートリサイクル時のCO₂利用

52

☞カルシウムカーボネートコンクリート(東京大学)

- ・コンクリート構造物中のカルシウム(Ca)をCO₂吸収源とみなし、構造物の解体によって発生するコンクリート廃棄物中のCaと大気中のCO₂(工場排ガス中の高濃度CO₂でも可)とを結合させて、炭酸カルシウムコンクリート(CCC: Calcium Carbonate Concrete)として再生する技術



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 - NEDO ムーンショット型研究開発事業「C'S 研究開発プロジェクト」-

野口貴文:「カルシウムカーボネートコンクリート(CCC)」が創造する資源循環の将来像。建設マネジメント技術, pp.64-69, 2022.2

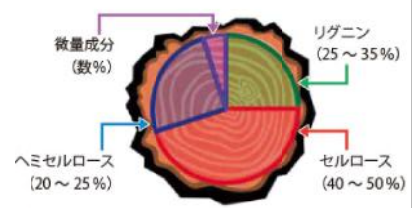
カーボンオフセット

53

企業活動や商品製造時により排出してしまう温室効果ガスのうち、どうしても削減できない量の全部または一部を、ほかの場所での排出削減・吸収量で埋め合わせする方法。

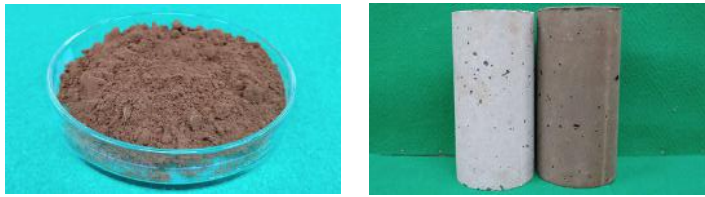
☞リグニコンクリート(大林組・日本製紙・フローリック)

製紙工場では木材チップを溶かし、パルプに加える過程で「リグニン」という物質が出る。樹木の重さの3割近くを占めており、燃やすとCO₂が発生する。



<https://marumohome.com/blog/blog.kobanashi/technic/20201022.html>

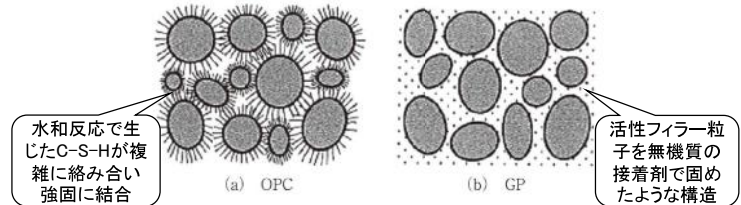
リグニンをコンクリートに添加することで、燃料として使用したり廃棄後に腐朽したりして、大気に戻ってしまうCO₂を長期間にわたり固定化できる。



- ・コンクリート製造時：約270kg-CO₂/m³排出
- ・リグニコンクリート製造時：約30kg-CO₂/m³排出
 - リグニンは1kg当たり約2.4kgのCO₂を吸収
 - 1m³のコンクリートに100kgのリグニンを添加することで、約240kg/m³のCO₂を固定化

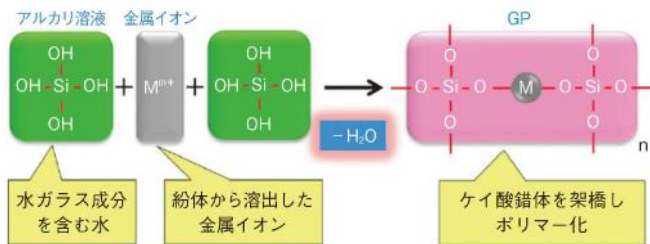
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220510_2.html

1988年にフランスのDavidovitsは、岩石由来の材料やFA、もみ殻のような副産物(以下、活性フィラー)に含まれるシリカ(SiO₂)やアルミナ(Al₂O₃)がアルカリ溶液と反応することを明らかにした。この化学的反応は重合(ポリマー化)であり、堆積岩と同じメカニズムで固化的ことから、これらのバインダーを「ジオポリマー」と名付けた。



出典:コンクリート工学Vol.55, No.2, pp.131-137, 2017年2月号

活性フィラーから溶出した金属イオンが水ガラスと接すると、ケイ酸錯体を架橋しポリマー化し、活性フィラー粒子を無機質の接着剤で固めたような構造になる。

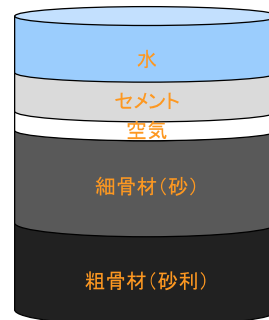


ゲル特有のスポンジ状の微細孔の生成が特徴的であり、GPは化学組成が天然ゼオライト(アルミノケイ酸塩のなかで結晶構造中に比較的大きな空隙を持つものの総称)に似ていると考えられているが、非結晶質であるため正確な究明は困難。

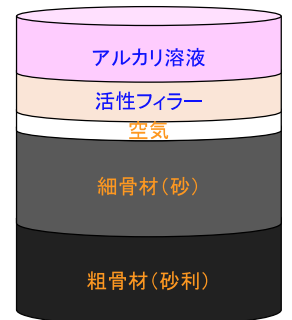
出典:コンクリート工学Vol.55, No.2, pp.131-137, 2017年2月号

セメントの代わりに活性フィラー、水の代わりにアルカリ溶液を混ぜて作るコンクリート。圧縮強度は、セメントコンクリートと同レベルまで発現が可能

(セメント)コンクリート



ジオポリマーコンクリート



活性フィラー

シリカとアルミナが豊富な材料が有利。メタカオリン、フライアッシュ微粉末、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、都市ごみ溶融スラグ微粉末など

アルカリ溶液

ナトリウムやカリウム由来の溶液。水ガラス、水ガラスに水酸化ナトリウム溶液あるいは水酸化カリウム溶液などを混ぜたものの



フライアッシュ微粉末



高炉スラグ微粉末

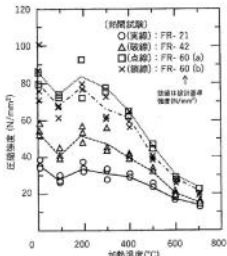
出典:コンクリート工学Vol.55, No.2, pp.131-137, 2017年2月号

CO₂-GP実験 No 7 ジオポリマーコンクリート - YouTube

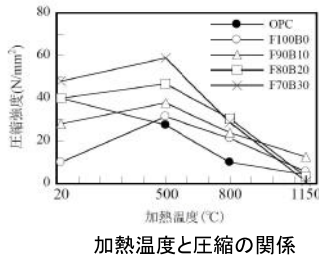
- ・練り混ぜ 11:30~12:30
- ・スランプ 17:00~18:30

耐火材料

普通コンクリートは、高温になるとセメント系水和物の脱水・分解が生じるため空隙構造が変化し、強度・剛性が低下する。ジオポリマーは、セメント系水和物が生じない、あるいは生成量が少ないために高温においても脱水・分解が生じにくい。



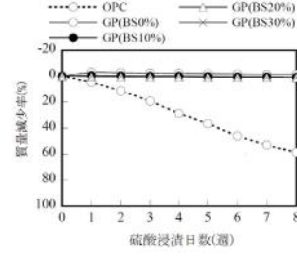
加熱温度と圧縮強度の関係 (コンクリート技術の要点 17, p.76)



加熱温度と圧縮の関係 (一宮一夫, 上野貴行, 原田健司, 池田攻, 高炉スラグ微粉末を添加したフライアッシュベースのジオポリマーの高温下における物性変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1269-1274, 2018)

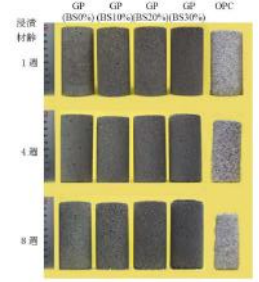
耐酸材料

セメントの場合はマトリックスがCa(OH)₂やC-S-Hで構成されているため、反応生成物が酸によって容易に溶解される。ジオポリマーでは、生成物がアルミノケイ酸塩縮合体であるので酸への溶解が生じにくい。



硫酸浸漬の結果(質量減少率)

(一宮一夫, 原田健司, 津田俊二, 池田攻, 活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2005-2010, 2013)



硫酸浸漬の結果(外観)

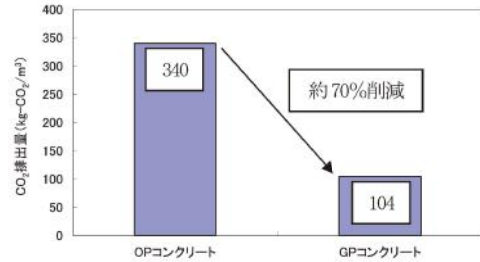
重金属ならびに放射性物質の固定

Cd, Pb等の重金属やSr, Cs等の放射性物質の固定に関する研究が実施されている。

一般に、カチオン選択性について、価数が大きく原子番号が大きいほど、水和イオン半径が小さいため吸着しやすく、ジオポリマーにおいても、同様であることを示す例もみられる。

低炭素・資源循環型社会構築のための建設材料

ジオポリマーは、フライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物を大量に利用可能である点、および石灰石の焼成を行わないので製造段階でのCO₂排出量を大きく削減できる。



試算の結果

出典:ジオポリマーの特性と施工事例, 西松建設技報, Vol.39, pp.1-6, 2016

GP溶液部の成分内訳ならびに配合指標

成分比を質量比ではなく、モル比で表すと、その反応に与える影響に関して元素の違いを意識することなく定量的に記述が可能

使用材料	成分		
NaOH溶液	NaOH	—	H ₂ O
KOH溶液	KOH	—	H ₂ O
水ガラス	Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O

(NaOH + KOH) / H₂O → A/W(モル比) : アルカリ水モル比
 SiO₂ / (NaOH + KOH) → Si/A(モル比) : Siアルカリ水モル比
 H₂O → W(kg/m³)

出典:コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

活性フィラーの影響

・FA: 低硬化体pH, 多孔質

常温での硬化に時間を要する(可使時間長) → 加温養生

・GGBS: 高硬化体pH, 緻密化, 硬化体自体は酸に対する抵抗性は低い

常温養生でも比較的早期に強度発現(可使時間短)

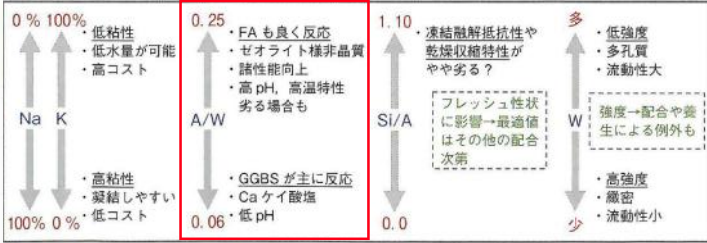
※GGBS: 水砕高炉スラグ微粉末



出典:コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

アルカリ/水モル比(A/W)の影響【(NaOH + KOH) / H₂O】
 溶液配合の中で最も生成物や諸性質に与える影響が大きい。

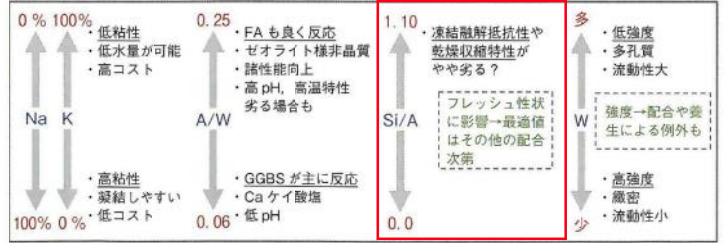
- ・低A/W: GGBSの反応が主要な要素になりやすい。
- ・高A/W: FAも良く反応するため、非晶質の3次元アルミノケイ酸塩物質も生じやすくなり、圧縮強度の他、多くの諸特性が向上する。



出典:コンクリート工学Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

Si/アルカリモル比(Si/W)の影響【SiO₂ / (NaOH + KOH)】
 Si/AはA/Wと比較すると諸性質に与える影響は小さい。

- ・高Si/A: 凍結融解性が劣る傾向があり、乾燥収縮も大きくなる傾向(最適なSi/Aは検討の余地が大きい)



出典:コンクリート工学Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

カリウム(K)系-ナトリウム(Na)系の相違

同一配(調)合で作製した場合、圧縮強度などの諸特性はおおよそ同じ。Kは溶液の粘性が小さく、凝結しにくいので、単位水量を減らして高強度化が可能だが、コストが高くなるので、Naの使用例が多い。



出典:コンクリート工学Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

単位水量(W)の影響

※溶液における純水部分Wを単位水量として定義

粉体量を一定とすれば、一般的に、Wが多いと強度が低く多孔質になりやすい。セメントコンクリートほど明確ではないが、Wが少ないと強度は高くなるが、フレッシュ性状は低下する。



出典:コンクリート工学Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号

養生温度の影響

より高温でFAの溶解反応が進行する。

- ゼオライト様の非晶質物質が多く生じる
- 常温養生ではGGBSの反応が支配的となる。
- C-A-S-Hが主な生成物

養生温度によって生成物が異なるため、圧縮強度などが同一でも性質が大きく異なる場合があるので注意が必要



出典:コンクリート工学Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021年9月号