

2050年カーボンニュートラルに対する コンクリートの挑戦



東京大学
大学院工学系研究科 建築学専攻
教授

野口 貴文 氏

プロフィール

1985年東京大学工学部建築学科卒、1998年東京大学工学部建築学科助教授。2014年より現職。

日本建築学会副会長、日本建築仕上学会会長、ACF (Asian Concrete Federation) 副会長、ISO/TC71/SC8議長、RRCs (生コン・残コンソリューション技術研究会) 代表理事などを歴任。

1 はじめに

2050年カーボンニュートラルの達成。この至上命題に対して、コンクリートは寄せられた期待に絶対に応えなければならない状況にあります。もし期待を裏切れば、100年後にはコンクリートがなくなっているかもしれない。こうした状況を踏まえて、コンクリートはどういう挑戦をしていくべきか、私見も含めてお話をいたします。

2 地球温暖化とセメント・コンクリートの現状・将来

2.1 地球温暖化の推移

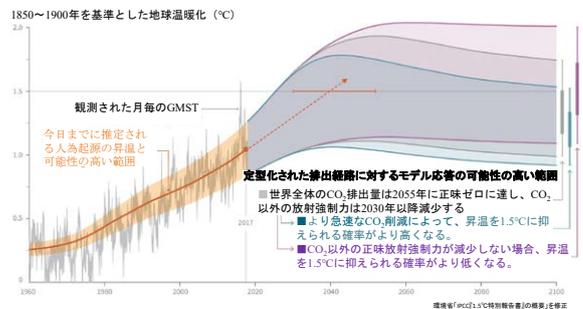
図1は地球温暖化の推移であり、このままの状態であれば2040～2050年には産業革命時からの温度上昇が1.5℃になることを示しています。「実際に1.5℃上がると何が起きるのか」という予測もされており、徐々にその兆しが見えはじめています。例えば、私が日本建築学会の副会長として発出しているメルマガにおいて、昨年は6月以降、毎月のように「なぜ、こんなに豪雨災害が増えるのだろうか」ということを書きました。そこで感じたのは「今まで、建築に対して豪雨災害対策を求めることはあまりなかった」ということです。河川整備等の対策で済んでいたものが、土砂災害も含めると対応しきれなくなりつつあります。そこで「建築側でも対策をとらなければいけないのではないか」という認識のもと、耐水建築等の検討が始まっています。土木と建築との共同プロジェクトが動き始めており、「災害を起こさないようにするためには」「災害が起きた時の対策はどうすべきか」等々、豪雨災害をテーマとしているものが最も活発な状況にあります。

地球温暖化の根本的な原因の一つが、地球温暖化物質の排出です。次のグラフ(図2)は、産業革命以降、地球温暖化物質がどのように上昇してきたのかを示しています。

グレーが化石燃料やセメント原料の燃焼により人為的に発生

・排出しているもの。これを見ると、産業革命の頃は収支のバランスが取れていた、排出した分は地球が吸収していたということが分かります。グリーンは主に森林等の陸上の生態系によって吸収固定されているグリーンカーボンと呼ばれるもの、ブルーが海水中に溶け込んだCO₂が貝やサンゴ等になって蓄積されたブルーカーボンです。このバランスが崩れ、薄水色で示された大気中に蓄積されている量が増えるとともに、地球温暖化が進行しているという実態を踏まえて、「地球温暖化物質の排出抑制」が至上命題になっているのが現状です。

地球温暖化物質の排出



COP26 (グラスゴー, UK)

- 世界の平均気温の上昇を1.5℃に抑える努力を追求することを決意する
- 各国の2030年に向けた排出削減の目標について2022年の末までに必要に応じて検証し、さらに強化することを要請する

図1 地球温暖化の推移

地球全体のCO₂の排出量・吸収量・濃度

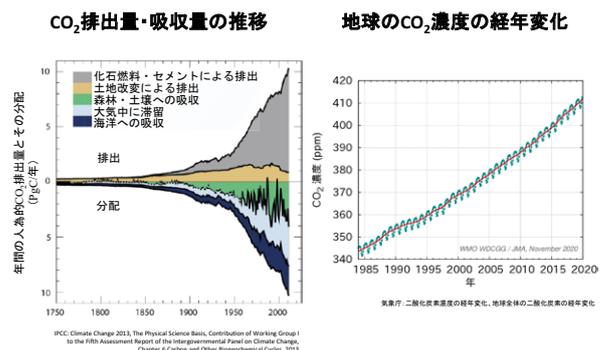


図2 地球全体のCO₂排出量・吸収量・濃度

2.2 セメント・コンクリートにおける CO₂ 排出・資源循環の現状・将来

2.2.1 日本の現状

日本におけるセメント・コンクリートはどのような状況にあるのでしょうか。図3で分かる通り、セメントは日本のCO₂総排出量の4.5%を占めており、製造業で最も多い鉄鋼に次ぐ状況です。ちなみに、世界全体で見た場合、全CO₂排出量の8%がセメントの生産によって発生していると言われています。4.5%の内訳は、半分が「脱炭酸」という石灰石を原料として加熱・分解する際に排出されたものであり、残りが1,450℃の高温にするために燃焼する石炭等、化石燃料による排出です。ここでは、セメントの生産、それも石灰石を分解する「脱炭酸」による排出量が年間約2,640万トンあるということをお憶えておいていただきたいと思います。

建築分野において最も多く排出しているのは、空調機や照明等、住宅やビル使用時のエネルギーによるものです。建築分野で排出されるCO₂の半分以上を占めます。これに土木構造物の建設やメンテナンスを加えると、世の中で排出されるCO₂の半分は土木・建築によるもので間違いのないと思われます。その中で何を削減すればよいのでしょうか。今、建築ではZEHやZEBと呼ばれるゼロエネルギーハウス、ゼロエネルギービルディングというものが進められています。つまり、住宅やオフィスビルのエネルギー消費が0になるという将来が見えてきているということです。残る分野は建設という行為。そして、建設におけるCO₂排出の大部分を鉄・コンクリートという材料が占めており、中でも「コンクリートのCO₂削減をどうすべきか」というのが今回の主題となります。

日本のCO₂排出量

日本の総CO₂排出量：1,190 (百万トン/年) ... 2017年



建設分野CO₂排出の現状

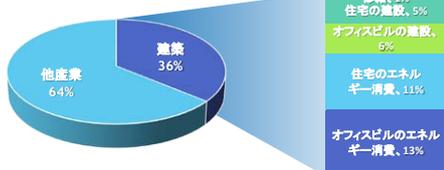


図3 日本のCO₂排出量

2.2.2 セメントの生産量、脱炭酸によるCO₂排出量

現状に対し、過去はどうであったのでしょうか。セメントの生産量を折れ線で示したものがこのグラフです(図4)。濃青色が年間生産量であり、今はピーク時の半分をさらに下回る程度の量であるという状況が読み取れます。薄水色のラインが日

本で生産されてきたセメント量の累積であり、石灰石の分解時に発生するCO₂の割合を半分程度と見込むと、橙色のラインが脱炭酸による累積CO₂排出量となります。つまり、日本においてこれまでのセメント生産によって排出された二酸化炭素量は約20億トンということです。世界全体でみれば、現段階で約500億トンのCO₂が累積で排出されているという状況にあり、その量は今後も増えていく見込みです。

セメントの生産量、脱炭酸によるCO₂排出量

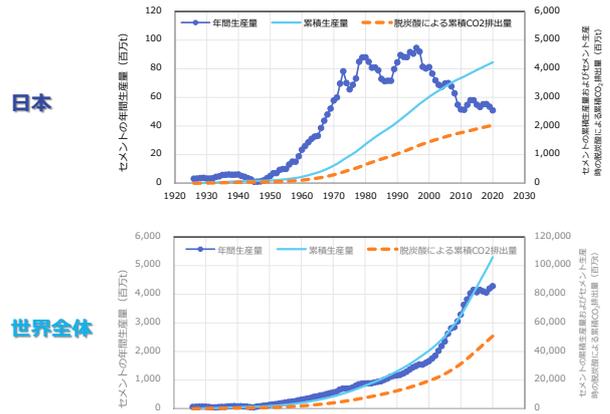


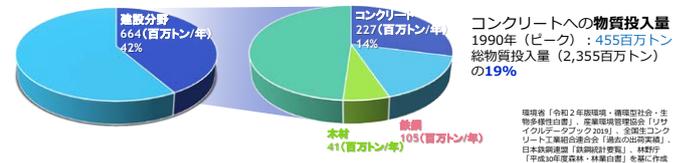
図4 セメントの生産量、脱炭酸によるCO₂排出量

2.2.3 建設分野への資源投入の現状・将来

一方、資源の循環を考えた場合、日本の全産業で投入された資源量(総物質投入量)は、2017年時点の資料(図5)で約15億9,000万トンとなっています。コンクリート生産のピーク時には、資源の半分が建設業界に投入され、さらにその約半分がコンクリートに投入されていました。つまり、世の中の資源の1/4はコンクリートを作るために投入されていたのです。

建設分野への資源投入の現状・将来

日本の総物質投入量：1,590 (百万トン/年) ... 2017年



世界全体のセメント生産量の推移・将来予測

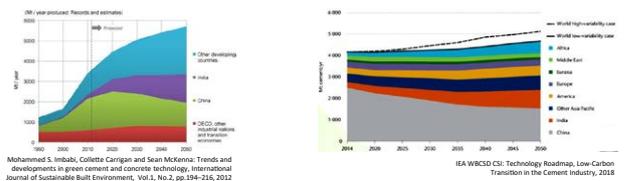


図5 建設分野への資源投入の現状・将来

世界に目を向けると、以前は2020年から2050年にかけて約1.5倍の勢いでセメントの生産量が伸びるのではないかと予測されていました。しかし、最近では約1.2倍程度にとど

まると言われています。この予測には、各国で進められるカーボンニュートラル化によりセメントクリンカー（石灰石等のセメント原料を焼成して得られる焼塊）が別の材料に置き換わることへの期待が含まれていると思われます。

セメント生産に必要な石灰石は、セメント生産だけではなく、鉄鋼生産や製紙、化粧品等にも使用されています。図6の青線は2008年までの累積消費量と、その傾きを維持したまま延伸させたものです。一番下の赤線が日本における石灰石の確定可採鉱量、上の橙色の破線が推定可採鉱量となっています。さらにその上の予想可採鉱量になると、採掘にかかるエネルギーやコストが増大し、現在高騰している石炭と同様の状況に陥ると予想され、「100年後にコンクリートが作れるかどうか」という状況が別の観点からもうかがえます。

この資源問題はカーボンニュートラルと同時に考えていかなければなりません。そして、それを考えるためには、コンクリートが今、どのような材料を原料にして作られ、使われ、また構造物が寿命を迎えた後にはどのようにリサイクルされ、廃棄されているかというマテリアルフローの現状を把握することが必要であり、その上で、将来の循環形成を考える必要があると考えます。

石灰石資源の枯渇

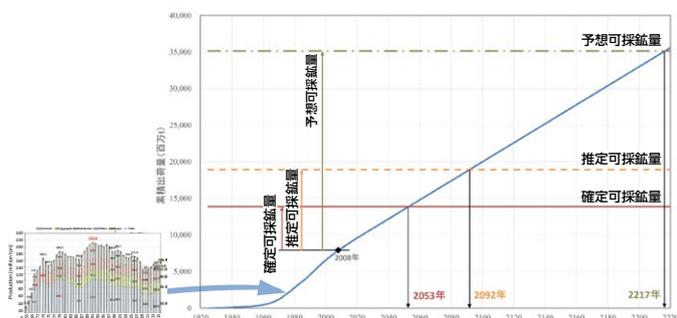


図6 石灰石資源の枯渇

2.2.4 セメント・コンクリートのマテリアルフロー

セメント・コンクリートの生産過程を大まかに言えば、岩石を砕いて骨材にし、セメントと組み合わせてコンクリートにする。それを構造物として蓄積していつか使われるのが現状です（図7）。そして、今はまだ古い構造物全てを壊すことなく新しい構造物を作っていますが、将来的には古いものを壊さないと新しいものが作れなくなる時がくるわけです。そんな時代が来た時に、古いコンクリートはどこへ行くのでしょうか。新しいコンクリートの原料はどこから取ってくるのでしょうか。そして、CO₂はどう扱っていけばよいのでしょうか。こういった観点が必要です。

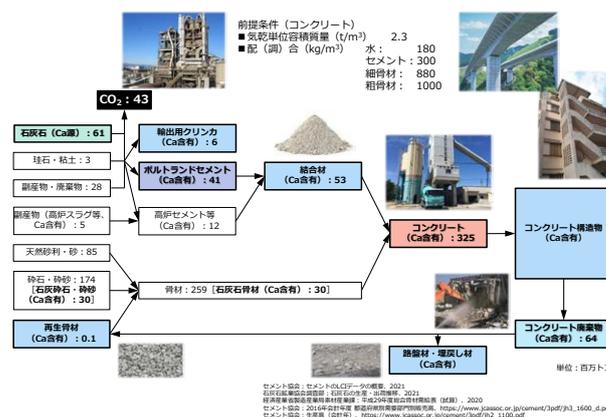


図7 セメント・コンクリートのマテリアルフロー

3 カーボンニュートラル化の方策

3.1 カーボンニュートラル化のイメージ

2050年カーボンニュートラルの達成に向けて、我々は何をしていくべきなのでしょう。カーボンニュートラル化のイメージを電力と非電力とに分けて考えると（図8）、最初に様々な設備機器における省電力化が進むであろうと考えられます。2番目には、電源の脱炭素化が再生可能エネルギーの利用といった形で進むと思われます。次に、非電力部門の中には加熱するために化石燃料を燃やしているものがあるので、それを電力化していきます。さらに、非電力部門のエネルギー資源について、今まで使ってきた化石燃料をバイオマス等に転換していく方法が4番目として考えられます。5番目は、エネルギーをそれほど使わずとも今のプロセスで物がつくられるようにするというものです。これら5つの方策でもCO₂排出は0にはならないと予測されています。

0にならない排出量を、どのようにして0にするのでしょうか。ここで必要となるのがCCS (Carbon (dioxide) Capture and Storage)やCCUS(Carbon(dioxide) Capture, Utilization and Storage)と呼ばれるものです。CO₂を捕らえ海底や地中等に貯蔵していく。あるいは、捕らえたCO₂を原料や燃料の源として使い、その過程でもCO₂を排出しないというものです。そして後者がコンクリートに期待されています。

カーボンニュートラル化のイメージ

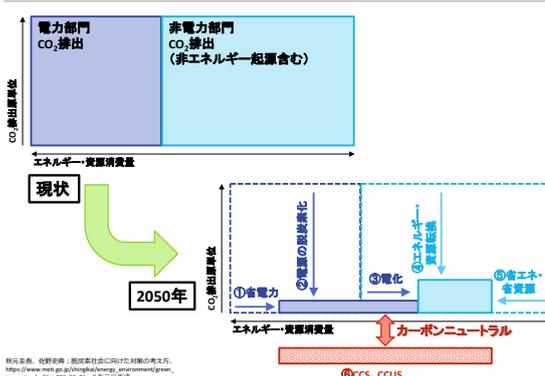
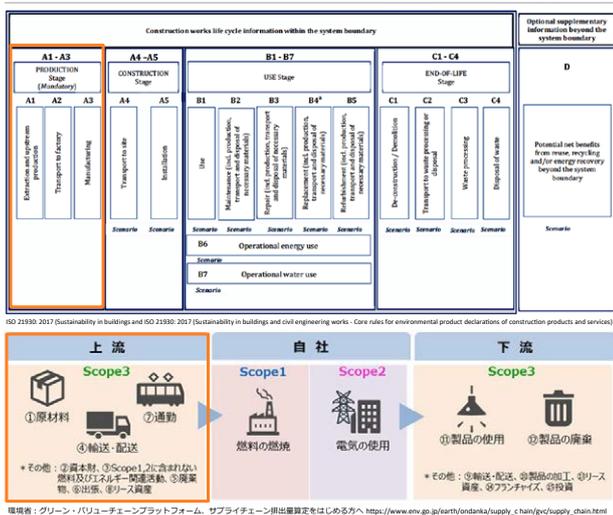


図8 カーボンニュートラル化のイメージ

3.2 建造物のライフサイクル

建造物の建設・供用におけるカーボンニュートラル化は、設計者と発注者など立場によって方策が異なります。というのも、発注者にとっては Scope 1・2 (図9) という建造物を使う過程で削減可能なものが対象となります。例えば電力を再生可能エネルギーで作られたものにする等です。一方で設計者側にとっては、Scope 1・2にとどまらず Scope 3、それも上流側の Scope 3における対策が CO₂削減にとって重要であり、最近では、設計事務所等が材料の供給者にカーボンフットプリントを求める動きも始まっています。当然、求められた材料供給者はその原料の製造者にカーボンフットプリントを求めることになり、徐々に上流側へとカーボンニュートラルの動きが伝播しつつある状況にあります。

建造物のライフサイクル、Scope 1・2・3



3.3 カーボンニュートラル化方策の種類

コンクリートでカーボンニュートラル化をどのようにして達成するのでしょうか (図10)。基本的には、石灰石の分解時のようなプロセスで発生している CO₂ を削減したり、そこで使用しているエネルギー量を減らしたりする形が一般的です。

現在行われている主な削減策は、セメントを作るプロセスで発生する CO₂ を削減するために、別の材料、それも副産物や廃棄物を使用する方策です。セメントクリーンカーをフライアッシュや高炉スラグ微粉末に置き換えることにより CO₂ 削減を実現するものです。この方策における課題としては、皆がこの方策を選んだ場合、材料が不足するということがあります。不足を補うために副産物・廃棄物であったものを主産物として製造すれば、今までは無視できていた CO₂ 排出量を

カウントする必要が出てくるため、この方策が生きてこないという状況に陥ってしまいます。最近、JFE スチール株式会社は倉敷市の製鉄所の一つを高炉から電炉に変えると表明しました。電炉になれば、現在使用している高炉スラグ微粉末は生成されません。また、石炭火力発電所も徐々に再生可能エネルギーに置き換えられ、フライアッシュが無くなるという事態が考えられるため、この方策は将来的な持続性が低いと思われます。

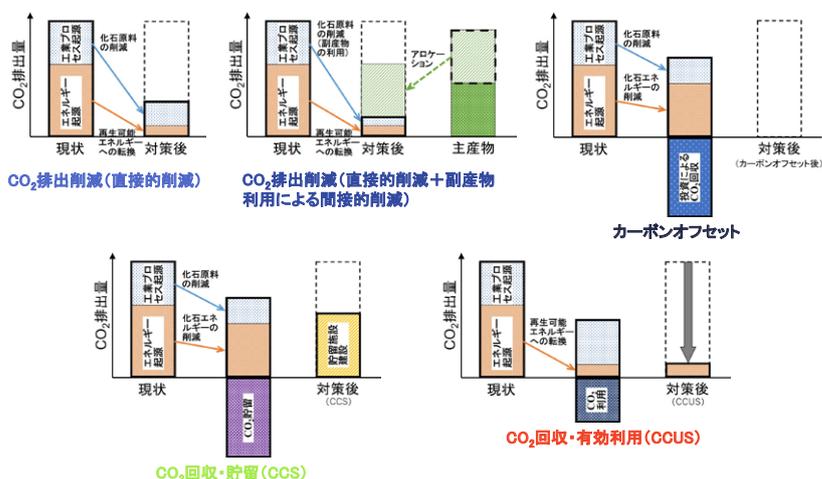
カーボンオフセットは、建設業界よりもサービス産業において多く採用されている方策と考えます。例えば航空業界。ジェットエンジンで相当の CO₂ を排出しているところ、森林開発をすることでオフセットをしています。しかし、造ることができる森林は有限であるため、この方策に対しても過剰な開発になりつつあるのではないかと指摘がなされています。

コンクリートに関係し、カーボンニュートラルを達成するために必須だと言われているものの1つが CCS であり、日本では苫小牧において実験的に開始されています。問題点・課題点としては、全国に当該施設を造るとなった場合に必要なエネルギー量を考慮しなければならないということ、そして、埋めた CO₂ が漏れないという保証がない限り、役に立たないということです。この点、海外では玄武岩層に CO₂ を埋め込み、CCUS 的なことをする試みが進んでいます。カルシウムとシリカとが結びついている玄武岩は、CO₂ に触れるとカルシウムが炭酸カルシウム (CaCO₃) に変わり、CO₂ を吸収固定します。これを玄武岩質の地層中で人工的に行おうとしています。

3.4 セメント業界における地球温暖化抑制シナリオ

セメント業界が 2050 年までにカーボンニュートラル化を達成するための方策としてどのようなものがあるのかを GCCA (Global Cement and Concrete Association) が示しました (図11)。グラフの通り、将来的には紫色で示した CCUS が相当の割合を占めると予測されています。他の項目は削減分であり、「どうしても使わざるを得ない技術以外は使わない」ということです。

カーボンニュートラル化方策の種類



地球温暖化抑制シナリオ

GETTING TO NET ZERO

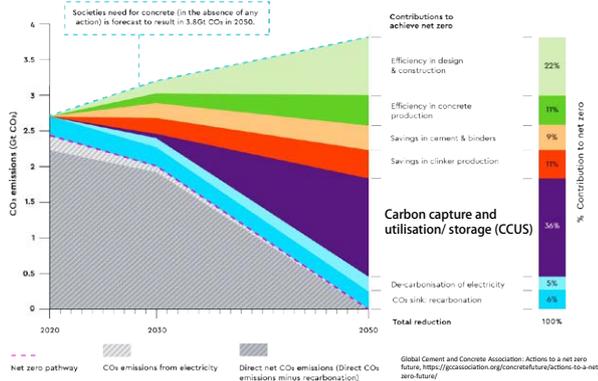


図 11 セメント業界における地球温暖化抑制シナリオ

4 コンクリートにおける CO₂ 排出削減技術・CO₂ 利用固定技術の現状

4.1 CO₂ 排出削減技術

セメント、混和材および骨材を練り混ぜてコンクリートにし、コンクリートを用いて構造物を建設し、解体して廃棄リサイクルをする。このようなコンクリートの一生を示したのが図12です。この中にある外向きの赤矢印がCO₂の排出であり、これまでは「これをいかに削減するか」という技術開発がなされてきました。2016年のパリ協定発効以降は「コンクリートに二酸化炭素を吸収固定させる」という取り組みが進み、今は、水色矢印で示されたCO₂の吸収利用が中心的な課題となってきました。

セメント・コンクリートのLCCO₂

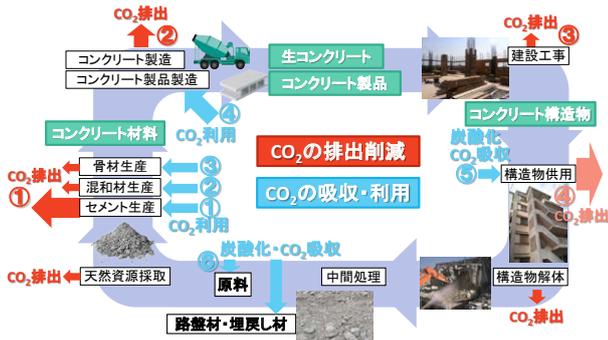


図 12 セメント・コンクリートのLCCO₂

4.1.1 セメント生産時の CO₂ 排出削減

セメント生産時のCO₂排出削減は、基本的に焼成時のエネルギー減少のみです。日本国内における省エネ化は70～80年代に相当進み、「これ以上省エネできない」というところまで来ています(図13)。そのため、最近では「廃棄物利用によるCO₂削減」が最も盛んであり、実際にセメント生産時の原料や燃料は約半分が廃棄物の利用となっています。ここにはバイオマスのものも含まれ、そこから排出されるCO₂はカウントされません。設備の省エネ化も進み、90年代以降は排出

される熱の有効利用も進みました。しかし、今の状態がいつまで続くのでしょうか。実際にCO₂自体は排出されているため、それを吸収固定する必要があると思われます。

①セメント製造時のCO₂排出削減

■ 焼成方法等の転換

- 1970～1990年
 - ◆ 予熱装置を有するSPキルン
 - ◆ 板焼炉を有する生産効率の高いNSPキルン
- 1990年代以降
 - ◆ 排熱発電
 - ◆ 廃棄物起源燃料の拡大
- 将来
 - ◆ 天然ガス焼成・流動層焼成
 - 炭分のCO₂排出削減
 - ◆ 太陽光焼成
 - 大規模CO₂排出削減
 - ◆ 水素焼成
 - 大規模CO₂排出削減
- 資源の転換
 - 生物起源石灰石の利用
 - ◆ 甲殻類
 - ◆ 石灰藻

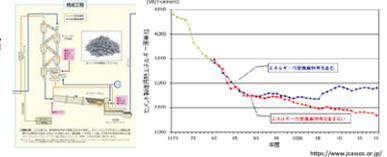


図 13 セメント製造時のCO₂排出削減

では、将来的な技術にはどういったものがあるのでしょうか。天然ガスを利用すれば多少のCO₂排出量削減にはつながるものの、根本的な解決までには至りません。そこで考えられる方策の1つに、太陽光焼成が挙げられます。フランスで実験的に進められているものであり、太陽光を集光して約1,450℃まで温度を上げることによってセメント原料を焼くという手法です。しかし、この方法では、需要に見合った大量のセメントを生産することは不可能であろうと考えられます。もう1つ、水素焼成という手法も研究されており、実際に使用可能となれば広がる可能性があるものですが、現在のところはコストがかかり過ぎて実用には耐えられず、その改善が期待されているところです。

さらに、燃料ではなく原料に関する研究も進んでいます。原料となる石灰石は、大気に存在していたCO₂が相当な時間をかけて石化したものです。それを人工的に作り出すという研究で、具体的には甲殻類や石灰藻を人為的に早く作り出し、人工的な石灰石として使用することが検討されています。

4.1.2 コンクリート製造時のCO₂排出削減

コンクリート製造時におけるCO₂削減では、「セメントクリンカーを減らす」ということが主となります(図14)。セメントクリンカーの一部を副産物・廃棄物に置き換えるとして、結合材の7割以上にフライアッシュ・高炉スラグ微粉末を使用したものも実用化されています。これらのコンクリートの問題点としては、今までアルカリ性であったものが中性に近づいているということが挙げられます。中性化の早期進行により内部の鉄筋が錆びて膨張し、ひび割れや剥落が発生する危険性が高まるのです。その克服が目下の課題となっています。

海外に目を向けると、LC³という焼成粘土を約3割とし、かつ石灰石微粉末を混入した結合材の実用化も進んでいます。セメントプラントをLC³製造用に転換するといった海外の記事

を月に1回は見かけようになりました。粘土は豊富な資源であるゆえ、当面の方策としては有効だと思われます。

また、全くセメントを使わず、無機系の材料を使用してポリマライゼーションを行い、コンクリートを生成するのがジオポリマーです。結晶質ではないアルミナシリカ粉末がアルカリ性溶液の中で溶け、縮重合反応を生じてポリマーとなります。

ジオポリマーの製造では、高炉スラグ微粉末・フライアッシュが現在よく使われている材料ですが、いずれも枯渇した場合はどうするのかなど資源量の観点からも将来性を考える必要があります。

②コンクリート製造時のCO₂排出削減

■ポルトランドセメント量削減

- クリーンコンクリート(大林組)
- ECMコンクリート(竹中工務店ほか)
 - ◆ 普通セメントの70%以上を高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームなどの産業副産物で置換
 - ◆ コンクリート構造物全般に適用可能
 - ▶ 基礎や地中梁などのマスコンクリートが最適
 - ◆ 中性化が速い
 - ▶ かぶり厚さの確保、鋼合の検討が重要
- LC³(Limestone Calcined Clay Cement)

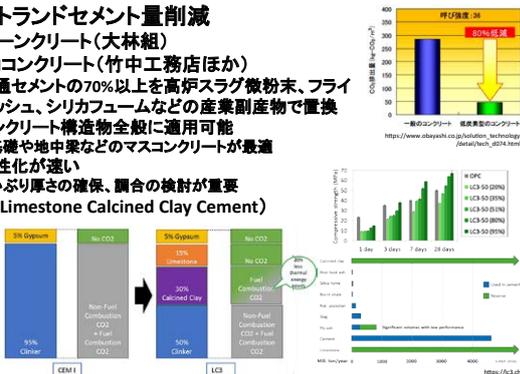


図 14 コンクリート製造時の CO₂ 排出削減

4.1.3 構造物建設時の CO₂ 排出削減

世の中の CO₂ 排出量から考えると、ゼネコンがカーボンニュートラル化を自身の Scope 1・2 で達成したとしても、実際には大きな影響がありません。しかし、「やらないよりは、やった方がいい」として建設業連合会が方策を提示しています(図 15)。

具体的には、使用する重機のハイブリッド化や電気自動車化、あるいは省エネに努めるということが主な CO₂ 排出削減方策となっています。

③構造物施工時のCO₂排出削減

国土交通省における地球温暖化緩和策の取組概要

【短期】
・生産性が向上するICT施工を建設業の大半を占める中小建設業へ普及を図る。

【中長期】
・ディーゼルエンジンに替わる革新的建設機械(電動、水素、バイオ等)の使用原則化を含め、導入拡大を図る。

【例】
バイオマス燃料(構物、プラント等) 水素エンジン(イメージ)

https://www.mlit.go.jp/comm/001386820.pdf

日本建設業連合会:CO₂かんたんチェック

CO ₂ 削減の取組	取組の取組
アイドリングストップ	アイドリングストップは、どの程度行っていますか?
重機・車両の適正整備	定期点検は、全ての重機・車両にありますか?
省燃費運転の実施	省燃費運転は、どの程度行っていますか?
こまめな消灯の実施	事務所・作業所の昼休みの消灯はどの程度行っていますか?
作業所照明の高効率化	作業所照明の内、蛍光灯の割合はどのくらいですか?
通風冷房の停止	事務所のエアコンを政府推奨値(夏:28℃以上、冬:-20℃以下)に設定した割合は、どのくらいですか?
ストーブ暖房の適正化	事務所のストーブ暖房で、室温を20℃以下に設定できた日は、どのくらいありますか?
エアコンへの転換	暖房器具のエアコンへの転換は、どの程度進んでいますか?

https://www.nikkeiren.com/kankyo/lowcarbon/co2check.html

図 15 構造物建設時の CO₂ 排出削減

4.1.4 構造物供用時の CO₂ 排出削減

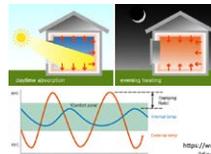
供用時の CO₂ 排出削減については、建築物・土木構造物のそれぞれが別の形で寄与することが可能です(図 16)。建築物の場合、例えば、太陽高度が低い冬に室内まで入り込んだ日射を利用し、日射熱で熱容量の大きなコンクリート等を温めるというものです。室内のコンクリートに蓄熱することで夜でも空調が不要な状況を作り出します。これはトロピカルゾーンではあまり効果が期待できませんが、日本等では有効な手段だと考えられます。一方、日本では有効性に疑問が残るものの欧州では有効だと考えられるものに、建築物の床に穴をあけて表面積を増やし、強制換気をしたり空気を循環させたりする方法があります。これは、夏季において、室内のコンクリート床に蓄積した熱を、外気を利用して排出することで冷房エネルギーの削減を図ろうとするものです。

土木構造物の場合、供用時の CO₂ 排出削減策の代表例として挙げられるのがコンクリート舗装の利用です。特に都市部の夏におけるヒートアイランド現象を緩和するためのものとして、透水性コンクリートの水分蒸散作用を利用した舗装表面の温度低下策が進んでいます。

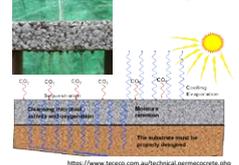
④構造物供用時のCO₂排出削減

■コンクリートの熱容量の利用

- パンプソーラーシステムによる暖房負荷軽減



- 透水性コンクリートによるヒートアイランド現象抑制・CO₂吸収



- パンプクーラーシステムによる冷房負荷軽減

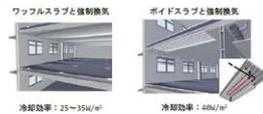


図 16 構造物供用時の CO₂ 排出削減

そしてもう1点、我々が忘れてはならないのが構造物の長寿命化です(図 17)。昔から検討されてきた長寿命化は CO₂ の排出削減にも有効な策です。しかし、建築物は寿命を全うできずに解体されることが非常に多い。この「寿命(=耐用年数)」には、劣化して駄目になる物理的な耐用年数を筆頭に、機能的耐用年数や経済的耐用年数、法定耐用年数等、様々な種類があります。また、経済的耐用年数は法定耐用年数とも減価償却という点で深くリンクしていたり、機能的耐用年数も経済的耐用年数と絡んでいたりします。この経済的耐用年数が、最も建築物の寿命を支配しているものであろうと考えます。破壊されれば新しいものを作らなければならず、それには材料が必要で、当然 CO₂ が排出されることになるわけです。建設した建築物は、できる限り長い期間使い続けていくというのが本来のあるべき姿ではないでしょうか。

①②③④ 構造物一生でのCO₂排出削減

■ 構造物の長寿命化

- **物理的耐用年数**
 - ◆ 材料・部品・設備が劣化して建築物の性能が低下することによって決定される耐用年数
- **機能的耐用年数**
 - ◆ 建築物が時代の変遷とともに期待される機能を果たせなくなってしまうことによって決定される耐用年数
- **経済的耐用年数**
 - ◆ 建築物を継続させるために必要となる費用が、建築物を継続させることによって得られる収益を上回ってしまうことによって決定される耐用年数
- **法定耐用年数**
 - ◆ 昭和40年大蔵省令第15号「減価償却資産の耐用年数等に関する省令」によって定められた、税務上、減価償却率を求める場合の基となる建築物の耐用年数
 - ◆ 建築物を構成している主要な部材・設備それぞれの物理的耐用年数をそれぞれの価格に応じて重み付けして平均化したもの

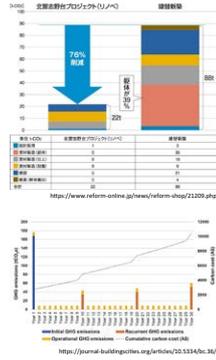


図 17 構造物の一生での CO₂ 排出削減

一方の土木構造物は、寿命100年とされています。しかし、本当に100年で壊すのでしょうか。壊さずに使い続けるしかないのではないのでしょうか。そうすると、土木の世界ではカーボンニュートラル達成は建築よりも早いのではないかと考えます。建築物でカーボンニュートラルを達成するためには、古い建築物に価値を見出し、容易に解体できないようにする必要があります。

4.2 CO₂ 利用固定技術

4.2.1 セメント製造時の CO₂ 利用

今後のセメント業界が目指すべきセメント製造時の CO₂ 利用については、経済産業省が方針を示しており、ハイデルベルグセメントというドイツの企業では既に試行が始まっています。

日本の経済産業省・エネルギー庁が示しているのは、廃コンクリート等を基に、もう一度セメントを作るといものです。循環形態を考え、カーボンニュートラルにしていくというのが目指す方向・方策の1つとなっています。

実際に、カリフォルニアのフォルテラ (Fortera) という企業が CO₂ を利用して炭酸カルシウムセメントを製造しています (図 18)。ここでは、バテライトからアラゴナイトへの形態変化を利用しています。バテライトとは不安定な炭酸カルシウムであり、顕微鏡で見るとこの製品は球状になっています。

① セメント製造時の CO₂ 利用

■ CO₂ を利用して炭酸カルシウムセメントを製造 (米国、Fortera)

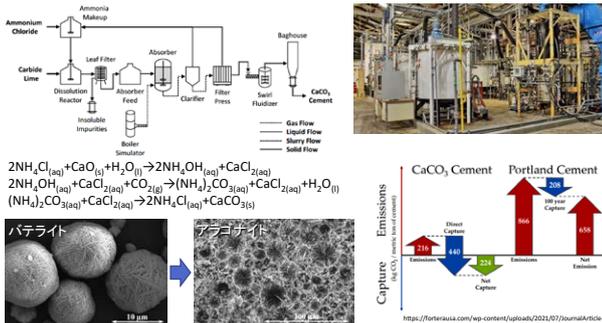


図 18 セメント製造時の CO₂ 利用

これを練り混ぜ、水の中である操作を行うことでアラゴナイトへと転換させるのです。このアラゴナイトは針状の結晶であり、絡み合うことで強度が生まれます。

4.2.2 混和材製造時の CO₂ 利用

セメント以外のコンクリート材料の製造において CO₂ を利用する技術は 2 種類あります。1つは、CO₂ を利用してコンクリート用混和材を作るといものです。CO₂ を用いて炭酸カルシウムの微細な粉末を人工的に作り出し、それをセメントクリンカーの代わりに使用するのです。実は、炭酸カルシウム自体は今のポルトランドセメントにも混合されています。セメントが反応する際、非常に微小な結晶質の炭酸カルシウムがあると、そこが選択的に反応生成物の析出核になり、セメントの反応を促進する効果が期待できるためです。

② 混和材製造時の CO₂ 利用

■ CO₂ を利用して混和材を製造 (大成建設、T-eConcrete/Carbon-Recycle)

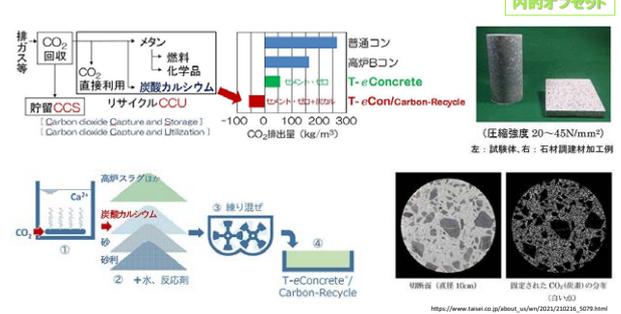


図 19 混和材製造時の CO₂ 利用 (その 1)

② 混和材製造時の CO₂ 利用

■ CO₂ を利用して混和材を製造 (日本コンクリート工業、エコタンカル)



図 20 混和材製造時の CO₂ 利用 (その 2)

もう1つの技術は、粉末ではなく骨材にするものです。アメリカのブループラネット (Blue Planet) 社などです。商品化もされている人工石灰石の骨材です。核の周りに炭酸カルシウムの層を造粒していく手法であり、既にサンフランシスコ空港の工事にも使用されています。骨材であるため、コンクリート中に相当量の CO₂ を固定できるのが特徴で、1立方メートルのコンクリートに790kgの CO₂ が固定されたと発表さ

れています。一般的なコンクリートが約300kgのCO₂を排出するので、その倍以上を固定している計算になります。同様の試みとしてイギリスでは、廃棄物由来のカルシウムやマグネシウムなどの元素を利用してCO₂と結合させて軽量骨材を製造しています。

③ 骨材製造時のCO₂利用

■ CO₂を利用して骨材を製造(米国: Blue Planet)

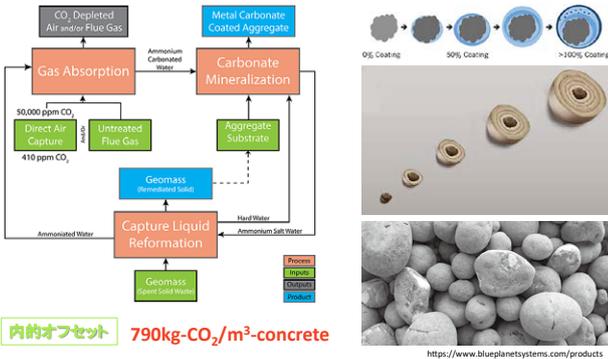


図 21 骨材製造時の CO₂ 利用

4.2.3 コンクリート製造時の CO₂ 吸収・利用

コンクリートの製造過程においてCO₂を吸収する技術もあります。まずは、生コンにCO₂を直接注入する技術を紹介します(図22)。非常に分かりやすいものですが、実際に注入可能な量は少量です。セメントが水と反応して生成した水酸化カルシウムは、CO₂と反応して炭酸カルシウムを作り出します。先述の通り、炭酸カルシウムの微少な結晶があるとセメントの反応が促進され、強度が上がります。そのため、セメント量が削減できるという理屈です。具体的な数値としては、1立方メートルのコンクリートの製造で15kgのCO₂排出削減となります。

④ コンクリート製造時のCO₂利用

■ 生コンクリートにCO₂を注入(カナダ: CarbonCure)

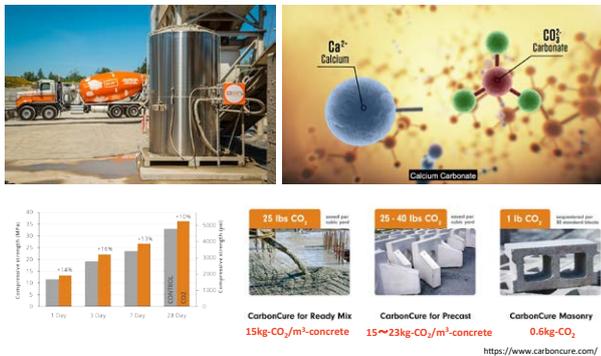


図 22 生コンクリートに CO₂ を注入 (カナダ: CarbonCure)

次に、CO₂を使用して養生するという昔からある技術です(図23)。セメントは水と反応し、その後は水和物である水

酸化カルシウムとCO₂が反応して炭酸カルシウムに変わるという中性化反応が生じます。その中性化を、セメントが反応して固まっていく過程に導入するものです。C₃SやC₂Sというセメントの鉱物を反応させる際、水のみならずCO₂も同時に反応に用います。すると、水酸化カルシウムではなくCaCO₃、つまり炭酸カルシウムが生成されるのです。この反応を成功させるためには、初期養生として水で養生し、その後でCO₂を供給して炭酸化養生をします。最後、事後養生として余った未反応のセメントを水和させ、コンクリートをアルカリ性にします。これら一連の養生工程によりコンクリートの強度が高まり、アルカリ性も担保できるという仕組みです。

④ コンクリート製造時のCO₂利用

■ 二酸化炭素養生によるCO₂吸収・固定および強度増進

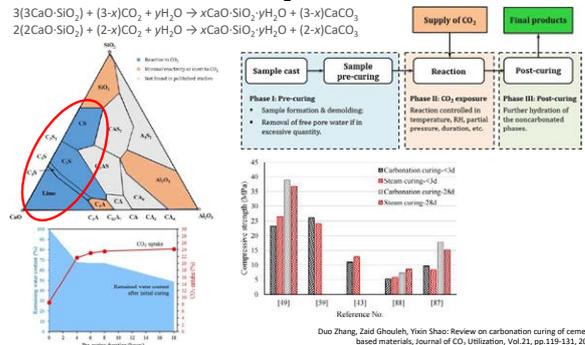


図 23 コンクリート製造時の CO₂ 利用 (炭酸化養生)

そして、環境配慮型コンクリート「CO₂-SUICOM」です(図24)。これは、セメントの一部をスラグやフライアッシュ、そして特殊混和材と呼ばれるCO₂と反応して硬化するγ-C₂Sに置き換えることで、クリンカー量を下げるといふものです。加えて、この特殊混和材であるγ-C₂SとCO₂の反応により炭酸カルシウムが作られることで、カーボンネガティブな状態になるという技術です。この技術も、高濃度のCO₂がないと硬化に相当な時間を要することになります。大気中に0.05%しかないCO₂での一般的なコンクリートの中性化は、表面から約3cm進むのに50~100年が必要となります。では、

■ CO₂と反応・硬化するセメント(γ-C₂S)を用いたコンクリート(鹿島建設・デンカ、CO₂-SUICOM)

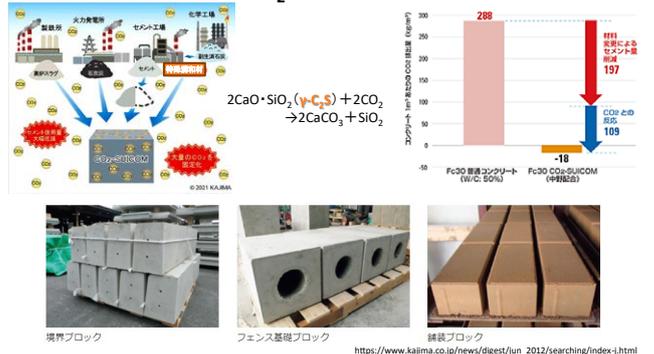


図 24 コンクリート製造時の CO₂ 利用 (SUICOM)

ブロックの芯までCO₂と反応するのにどの程度の時間が必要となるのでしょうか。それを考えると、高濃度CO₂が使用可能な工場が必須となる技術と言えるでしょう。また、この特殊混和材は、副生消石灰を原料としています。アセチレンガスの原料となるカルシウムカーバイドを作る際に出る副産物であるため、この特殊混和材を作る際にはCO₂が発生しないという位置づけとなります。そのため、前述の通り、現在副生消石灰から製造されているγ-C₂Sが主産物となった場合、発生するCO₂をどう考えていくのが、今後の課題となってきます。

同様のものに、約20年前に開発され、最近になって実用化されたカーボフィックスというセメントがあります(図25)。昨年度までのNEDO事業において実際に実用化されたもので、このセメントを主産物として作ることを想定した場合にどの程度CO₂を削減できるのかの試算も示されています。このセメントの正体はβ-C₂Sです。これは普通のポルトランドセメント中のC₂Sと同じであり、水和もするしCO₂と反応して炭酸カルシウムにもなるという特徴を利用したものです。このセメントは、製造時にあまり温度を上げる必要がないためエネルギーの削減が可能であり、原料も通常より少ない石灰石量でよいいため、それらの点でもCO₂の削減を図れるという利点があります。さらに、硬化過程で吸収するCO₂も加味すると、通常のCO₂排出量の半減以上の効果が期待できます。

④コンクリート製造時のCO₂利用

■CO₂と反応・硬化するセメント(β-C₂S、カーボフィックスセメント)を用いたコンクリート(太平洋セメント)

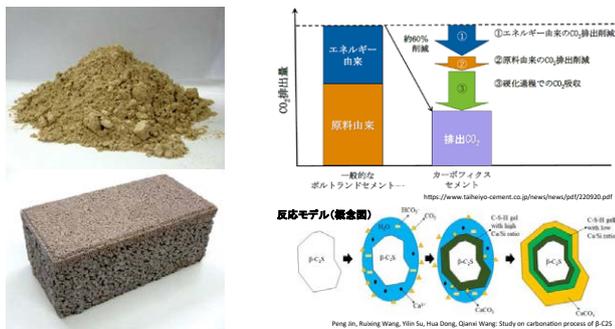


図25 コンクリート製造時のCO₂利用(カーボフィックス)

海外にはSolidia社が作るCSを用いたソリディアセメントがあります(図26)。CSという鉱物はCO₂と反応して炭酸カルシウムを作るのですが、その過程で硬化が終了するため、1日で製品となるようです。

④コンクリート製造時のCO₂利用

■CO₂と反応・硬化するセメント(米国、Solidia)を用いたコンクリート

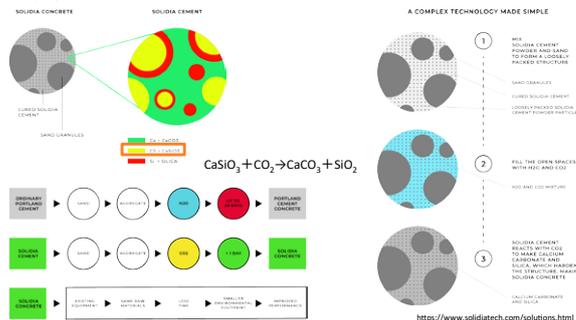


図26 コンクリート製造時のCO₂利用(Solidia)

もう1点、消石灰(Ca(OH)₂)にセメント、フライアッシュ、スラグ等々を混ぜたと考えられるものの、その詳細が明らかになっていない技術があります(図27)。子細は不明なものの、米国で名誉あるプライズを受賞した確かな技術です。この材料は主にブロックの生産に使用されており、建築物の構造用途ではない壁等への使用が想定されているのではないかと考えられます。消石灰がCO₂と反応して炭酸カルシウムに変わるという形で、CO₂の吸収固定を実現しています。

以上のコンクリート養生時のCO₂固定化技術に共通するのは、CO₂濃度が相当高い雰囲気が必要であるということです。つまり、工場製品に限られる技術だということでもあります。

④コンクリート製造時のCO₂利用

■CO₂と反応・硬化するセメント(消石灰)を用いたコンクリート(米国、CarbonBuilt)

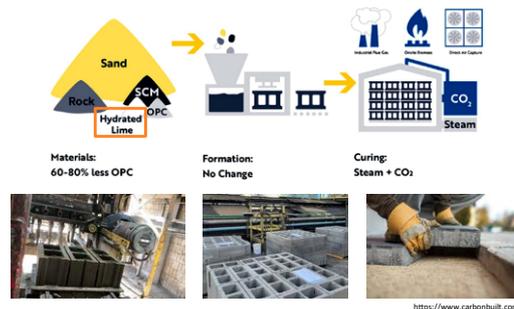


図27 コンクリート製造時のCO₂利用(CarbonBuilt)

4.2.4 コンクリートリサイクル時のCO₂利用

構造物の解体によって生じた廃コンクリートは、リサイクルの際に破砕して水をかけるため、再生骨材は相当量のCO₂を吸います。この吸収量については、かなり以前から研究が始まっていて、北欧では2000年代の初頭に研究が行われ、日本でも2010年頃から実態調査、実験等が行われています。その結果、炭酸カルシウムが再生骨材の空隙を埋めてくれるため、緻密な構造が作られるとして、「再生骨材を使って良いコンクリートが作れる」という技術の展開につながっています。

⑥コンクリートリサイクル時のCO₂利用

■炭酸化した再生砕石・再生骨材

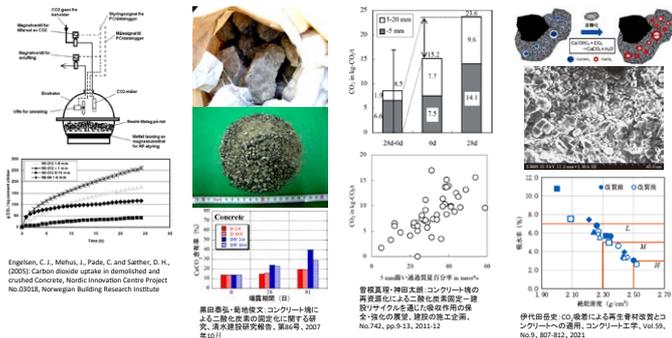


図 28 コンクリートリサイクル時の CO₂ 利用

5 カーボンニュートラルコンクリートに向けた政府の取組み

5.1 日本の温室効果ガス削減目標の推移

2050年カーボンニュートラルは、2020年10月の菅前首相の国会演説において表明されました。その半年後には、2050年カーボンニュートラル実現のためには2030年で2013年度比46%減という数値も発表されています。それまでの大まかな推移としては、京都議定書で採択された目標に向けて徐々に下がってきた温室効果ガス排出量でありましたが、東日本大震災により目標達成が無理となり上昇に転じることとなります(図29)。その後、再度目標値を下げはしたものの欧州等からの非難に遭い、より下げざるを得ない状況に陥ってしまいました。そして現状は、2030年まで8年を切った状況ではありますが、コロナ禍という事情もあり、46%減という目標達成に向けて比較的順調に進んでいるといえます。そして、GI基金を元にした開発がさまざまな分野で進められており、コンクリートもその一翼を担う存在として位置づけられています。

日本の温室効果ガス削減目標の推移

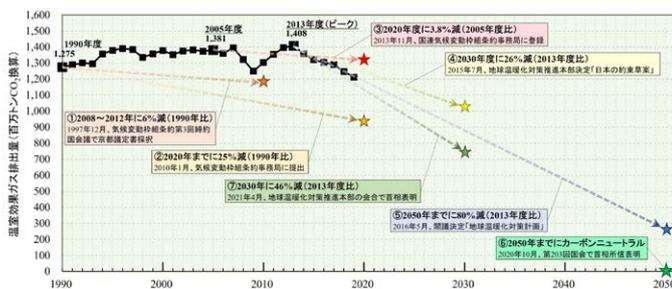


図 29 日本の温室効果ガス削減目標の推移

5.2 セメント・コンクリート系の NEDO 事業

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) においては、グリーンイノベーション (GI) 基金事業より前から先行的に進められているプロジェクトがいくつか存在していますが、それらは概ね、CO₂を用いた炭酸塩製造技術の開発が、セメント工場のCO₂をいかにCCSやCCUSへと導くかという技術開発です(図30)。

事業名	研究開発項目	実施者	事業期間
炭酸塩製造セメント製造プロセス技術開発	1)セメントキルン排ガスからのCO ₂ 分離・回収パイロット実証 2)再資源化によるCO ₂ 排出削減・CO ₂ 固定化研究開発 2-1)セメント廃棄物(廃コンクリート、生コンクリートスラッジ等)の再資源化(セメント原料化、土木資材化)によるCO ₂ 排出削減 2-2)セメント製品(生コンクリート、コンクリート製品等)へのCO ₂ 固定	太平洋セメント	2020~ 2021年度
カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発/炭酸塩・コンクリート製品・コンクリート製造物へのCO ₂ 利用技術開発	化石燃料排ガスのCO ₂ を微細メス技術により回収、CO ₂ を原料とする炭酸塩生成技術の研究開発 海水および廃かん水を用いた有機物産CO ₂ 固定化技術の研究開発 マイクロ波によるCO ₂ 吸収体結晶の研究開発→トリプルリサイクル技術(CO ₂ -TricOM:シーオートリコム)の開発 廃コンクリートなど産業廃棄物中のカルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセスの研究開発	双日、トクヤマ、ナノミステックロジーズ 早稲田大学、サクラ、日揮グローバル 中国電力、広島大学、中国高圧コンクリート工業 出光興産、宇部興産、日揮グローバル、日揮、成鉄大学、東北大学	2020~ 2024年度
カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電技術推進事業/カーボンリサイクル技術の先進実用化技術開発	セメント系廃材を活用したCO ₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究	竹中工務店	
カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電技術推進事業/カーボンリサイクル技術の先進実用化技術開発	カルシウム含有廃棄物からのCa抽出およびCO ₂ 鉱物固定化技術の研究開発	住友大阪セメント、山口大学、九州大学	2020~ 2022年度
カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO ₂ 有効利用技術開発	CO ₂ 有効利用コンクリートの研究開発	中国電力、鹿島建設、三菱商事	2020~ 2024年度
ムーンショット型研究開発事業	C ₂ S研究開発プロジェクト C ₂ S: Calcium Carbonate Circulation System for Construction (建設分野の炭酸カルシウム循環システム)	東京大学、北海道大学	2020年度 から最長 10年間

図 30 セメント・コンクリート系の NEDO 事業

5.3 成長戦略

こうした中、2050年カーボンニュートラル宣言がなされた後、順次具体的な施策化が進み、閣議決定文書の中にコンクリートが登場することになります(図31)。CO₂を吸収して造るコンクリートの価格を抑え、かつ大阪万博で試行的に使用するという具体性を持って書かれた文書です。

■「成長戦略実行計画」(2021年6月18日閣議決定)

- 第3章 グリーン分野の成長
 - (3) 分野別の課題と対応
 - ④カーボンリサイクルに係る産業・マテリアル産業
カーボンリサイクルは、**CO₂を資源として有効活用**する技術であり、カーボンニュートラル社会の実現に重要な横断的分野である。日本に競争力があり、コスト低減、社会実装を進めた上で、グローバル展開を目指す。具体的には、**CO₂吸収コンクリート**は、2030年には需要拡大を通じて既存コンクリートと同価格(≒30円/kg)を、2050年には防錆性能を持つ新製品を建築用途にも使用可能とすることを目指す。
- 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(2021年6月18日)
 2. グリーン成長戦略の枠組み
規制改革・標準化については、……**CO₂を吸収して造るコンクリート**等の公共調達等について検討し、需要の創出と価格の低減につなげていく。
 3. 分野横断的な主要な政策ツール
(7) 2025年日本国際博覧会
 - ①革新的なイノベーション技術の実証
例えば、以下のような取組について、大阪・関西万博の会場等における実証等を目指す。
カーボンリサイクルを駆使する……**CO₂吸収コンクリート**について、**労働力を活用**して性能向上に必要な実証等を行う。
 4. 重要分野における実行計画
(11)カーボンリサイクル・マテリアル産業
 - ①カーボンリサイクル
 - ①コンクリート・セメント(項目抜粋)
コスト目標として2030年には、**既存コンクリートと同価格**(≒30円/kg)
②**炭酸塩化**の大規模な国際展示会等を行い「アジア」圏を拡大
③CO₂吸収剤の制御技術の開発や**炭酸塩材料の活用**等により防錆性能を持つ新製品を開発・実証し、建築物やコンクリートシロウク用途拡大
④CO₂吸収量の増大と**低コスト化**を両立させた新技術・製品を開発
⑤地域等に有効な**CO₂吸収コンクリート**の製造技術を開発
⑥国内**セメント工場で大量のCO₂回収**を実現する技術の開発
⑦既存製造工程を基に、**石灰石からの抽出CO₂を100%回収**するプラントの開発
⑧産業物の多様な再利用も含め、**抽出したCO₂を気体や炭酸塩として有効活用**する技術の開発や商用化
⑨2030年以降、**国内セメント工場(キルン3基)**への導入を進めるとともに、2050年までに、**世界最大のキルン改修・増設**等における導入
→カーボンリサイクルコンクリート・セメントを用いた**製品・建築物**を利用可能な**市場環境の創出**により、需要創出が環境配慮や長寿命といったニーズに合わせた製品・建築物を選択

図 31 成長戦略

5.4 NEDO・グリーンイノベーション基金事業

その後、NEDOのGI基金事業が始まりました。総額2兆円に上る事業の中で、10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援するものです。このGI基金事業の中に「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」が含まれており、4つの課題が採択されました。

NEDO・グリーンイノベーション基金事業

総予算	2兆円
支援対象	野心的な2030年目標（性能、コスト、生産性、導入量、CO ₂ 削減量等）を目指すプロジェクト
対象事業者	社会実装までを視野に入れた事業であるため企業等が対象
プロジェクト期間	最長10年間
プロジェクト規模	従来の研究開発プロジェクトの平均規模（200億円程度）以上
支援スキーム	プロジェクトには国が委託するに足る革新的・体系的な研究開発 ①大規模水素サプライチェーンの構築 ②再生水等由来の電力を活用した水電解による水素製造 ③次世代航空機の開発 ④次世代船舶の開発 ⑤製鉄プロセスにおける水素活用 ⑥燃料アンモニアサプライチェーンの構築 ⑦海上風力発電の低コスト化 ⑧次世代型太陽電池の開発 ⑨CO ₂ 等を用いたプラスチック原料製造技術開発
プロジェクト名	⑩CO ₂ を用いたコンクリート等製造技術開発 ⑪次世代デジタルインフラの構築 ⑫次世代蓄電池・次世代モーターの開発 ⑬CO ₂ の分離回収等技術開発 ⑭CO ₂ 等を用いた材料製造技術開発 ⑮電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発 ⑯スマートモビリティ社会の構築 ⑰食料・農林水産業のCO ₂ 等削減・吸収技術の開発
CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発（550億円）	
研究開発項目	1. CO ₂ 排出削減・固定量最大化コンクリートの開発 2. CO ₂ 排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理・固定量評価手法に関する技術開発
実証テーマ	①革新的カーボンナガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発 ②CO ₂ を高度利用したCARBON POOLコンクリートの開発と部材および構造物への実証 ③コンクリートにおけるCO ₂ 固定量評価の標準化に関する研究開発
セメント分野	3. 製造プロセスにおけるCO ₂ 回収技術の設計・実証 4. 多様なカルシウム源を用いた炭酸塩化技術の確立
実証テーマ	④CO ₂ 回収型セメント製造プロセスの開発

図 32 NEDO・グリーンイノベーション基金事業

1つ目が鹿島建設グループによるCO₂-SUICOMやエコタンカルを含むものです。骨材も対象に含まれており、炭酸カルシウム骨材が製造されると思われます。2つ目が安藤ハザマググループによるカーボンプールコンクリートです。主に廃棄物を炭酸化させてコンクリート用原料として用い、さらに道路舗装をポーラスコンクリートとすることでCO₂との反応を促そうというもの、つまり、コンクリートにしてからもCO₂を固定化させようというものです。3つ目は東京大学グループによるCO₂固定量の評価手法の開発のみを行うプロジェクトであり、コンクリートに固定されたCO₂を正しく評価し、管理していくための技術開発となっています。

4つ目はセメント分野の技術開発であり、太平洋セメントグループと住友大阪セメントグループが同じ課題を分け合う形で、それぞれ別の技術開発を行っています。太平洋セメント側は、セメント工場から出るCO₂を回収してメタネーション（水素と二酸化炭素からメタンを合成）し、それを燃料として使用するというものです。住友大阪セメント側は、排出されたCO₂を炭酸塩化するもので、そこにはエコタンカルのような炭酸カルシウムの製造開発も含まれているのではないかと思います。また、また、炭酸塩を原料としてカーボンリサイクルセメントを製造する技術開発も含まれているようです。

5.5 CO₂ 固定量の評価方法

CO₂固定量の評価方法についてお話しします。「どの程度のCO₂を固定しているのか」の評価方法は、現在はJISが存在しません。そのため、私が委員長を仰せつかって日本コンクリート工学会にてJISを作っています。開発に携わる方からは「正確ではなくてもよいので、とにかく早く標準化して欲しい」という要望があります。「ひとまず策定し、より正確に評価できる技術が開発されればそちらに置き換えていけばいい」という考え方であり、その奥には「自分たちが開発した製品がどの程度のCO₂を固定しているのか、とにかく表明したい」という思いが読み取れます。この流れを受け、他製品のJISにおいて既に標準化されている技術、および既に一般的に利用されている技術、すなわち、湿式分析法および熱重量分析法の2つ

に関しては来年中にJIS化する方向で話が進んでいます。ただし、正確に評価するためには、解決すべき課題がいくつか存在しています。

日本コンクリート工学会「カーボンリサイクル評価方法のJIS原案作成委員会」

- 経済産業省・委託事業「産業標準化推進事業」(2021年度)
 - 2050年カーボンニュートラルに資するコンクリート構成材料及びコンクリートのカーボンリサイクル評価方法に関する標準化調査
- 経済産業省・委託事業「省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業」(2022～2024年度)
 - 2022～2023年度
 - ◆ 熱重量分析に基づく構成材料、コンクリート及び再生材のCO₂固定量の測定方法・表示方法のJIS化
 - ◆ 湿式分析に基づく構成材料、コンクリート及び再生材のCO₂固定量の測定方法・表示方法のJIS化
 - ◆ CO₂利用量に基づく構成材料、コンクリート及び再生材のCO₂固定量の測定方法・表示方法のJIS化
 - 2023～2024年度
 - ◆ 革新技術に基づくCO₂固定量の測定方法のJIS化
 - ▶ コンクリート試料(直径100mmオーダー)を測定可能な方法
 - ▶ 試料のばらつきが無くできるサイズ
 - ▶ 高い繰り返し性(repeatability)、高い再現性(reproducibility)
 - ▶ それほど長くない測定時間
 - ▶ それほど高価でない測定機
 - ▶ 天然の炭酸カルシウムと人工の炭酸カルシウムとの判別可能な測定方法
 - ▶ 有機物に含まれる炭素分を控除可能な測定方法
 - ▶ 固定化されたCO₂の状態(完成度の違い)を区別可能な測定方法



図 33 日本コンクリート工学会「カーボンリサイクル評価方法のJIS原案作成委員会」の活動状況

コンクリートの力学特性を調べる試験では、直径10cm、高さ20cm程度の硬化体を用いて計測を行っています。しかし、材料の化学分析では、ミリグラムオーダー、マイクログラムオーダーの試料が基本であり、コンクリートからそのオーダーの試料を作成する場合には、当然ばらつきが発生してしまいます。そのため、例えば熱重量分析を行う際には、代表試料を作製するための分級技術を標準化しなければなりません。こうした課題に対し、せめてグラムオーダーの試料でCO₂固定量の測定が行えるようにするための技術開発が、GI基金で進められています。

また、天然の炭酸カルシウムと人工の炭酸カルシウムとの区別も問題となってきます。何億年もかけてCO₂を固定してきた天然の石灰石をコンクリート用材料として用いた場合、そのコンクリートはCO₂を固定していると言うには無理があります。セメント生産時の瞬時のCO₂排出と何億年もかかったCO₂固定とを同じ土俵の上で評価するわけにはいきません。そのため、天然と人工とを区別するために炭素同位体による評価を行うことが検討されています。

さらに、有機物が混ざっていた場合にも問題があります。熱重量分析は、温度を上昇させて「何℃で分解するか」を測るもので、有機物は低温でかなり早く分解し、さらに、有機物の燃焼によるCO₂が発生することとなります。このCO₂が水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムに変わるという事態が発生するため、元々入っていた人工炭酸カルシウムと分析過程で生じた炭酸カルシウムとを区別する必要が出てくるのです。

もう一点、「CO₂をコンクリートが固定している」と評価するためには、その状態が長年に渡り継続する必要があります。もし固定したものが1年後に排出されてしまうのであれば、いま排出しているのと大して変わらず、固定されていると評価するのは難しいです。そのため、安定した状態の炭酸カルシウムとそうでないものとを区別できるのか、という問題も存在し、

そのための技術開発も進められています。

6 ムーンショット型研究開発「C⁴S 研究開発プロジェクト」

6.1 NEDO ムーンショット型研究開発

最後に、ムーンショット型研究開発についてお話しします。ムーンショットという課題は、ハイリスク・ハイリターンで画期的な技術を研究開発するものです（図34）。

NEDOムーンショット型研究開発

■ムーンショット

- 我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発

■ムーンショット目標4

- 「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」
- ターゲット
 - ◆ 地球環境再生のために、持続可能な資源循環の実現による、地球温暖化問題の解決(Cool Earth)と環境汚染問題の解決(Clean Earth)を目指す。



図34 NEDO ムーンショット型研究開発

ムーンショット型研究開発目標の1つに、大気中に分散するCO₂を極力早く回収して製品として循環利用することでCO₂濃度を産業革命以前の状態にまで削減するというものがあります。工場排ガスではなく大気を対象とし、大気中のCO₂をいかに回収して使用可能なものとするか。我々のプロジェクトではそれをコンクリートで実現すべく、炭酸カルシウムコンクリート(CCC: Calcium Carbonate Concrete)の新規開発を進めているところです。ちなみに、同時に8つのプロジェクトが動いており、他の7つのプロジェクトは全て大気中のCO₂をCO₂として回収する技術そのものの開発となっています。

C⁴S研究開発プロジェクト

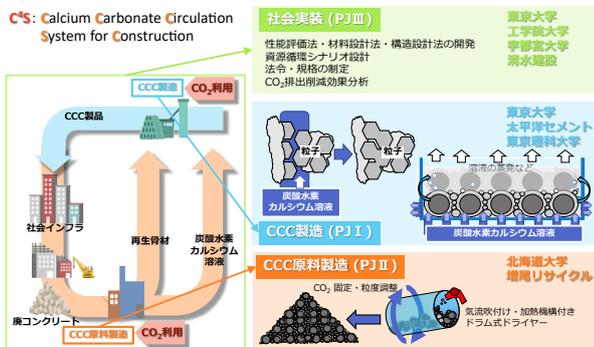


図35 C⁴S 研究開発プロジェクトの全体像

CCCの原料は、既に建設されている構造物中のコンクリートとCO₂、そして反応に必要な媒体である水です。それらを用い、まずは廃コンクリートを破砕してCO₂を吸収固定(炭

酸化)させます(図36)。その中からセメント分の多い小さな粒子を水中に入れて大気をバブリングすることで、炭酸水中にカルシウムを溶出させます。さらにバブリングすると透明な炭酸水素カルシウム溶液となり、イオンとしてカルシウムとCO₂が多く溶け込んだ状態になります。この溶液を破砕して炭酸化させた粗い廃コンクリート粒子の間に通水し、温度やpH値を上げたり、乾燥させたりという工程を経て、粒子間に炭酸カルシウムを析出させます。析出した炭酸カルシウムが針状結晶のアラゴナイトとなって絡み合い硬化していくというメカニズムです。当初は直径1cmだったCCCが、現在では直径10cm程度のもまで作製可能となっており、強度も最初は10MPa以下だったものが、今は高いものだとして50MPaのものまで作れるようになってきています。標準的には20MPa程度の強度を有するため、近い将来、実用化も可能と考えています。

CCC(Calcium Carbonate Concrete)

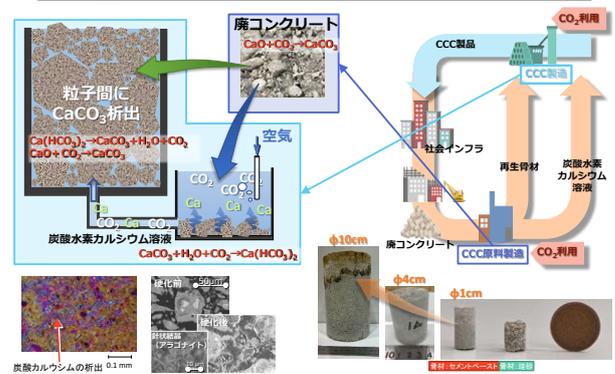


図36 CCC (Calcium Carbonate Concrete)

6.1.1 CCCのカーボンニュートラル性

このCCCは1立方メートルで約124kgのCO₂を吸収固定可能であり、製造に使用するエネルギーを加味しても、カーボンマイナスになる計算です(図37)。ただし、CCCのリサイクル時には、1度CO₂を吸わせたものをそのまま使うため、2度目以降はCO₂吸収量ゼロということになります。

CCCのカーボンニュートラル性

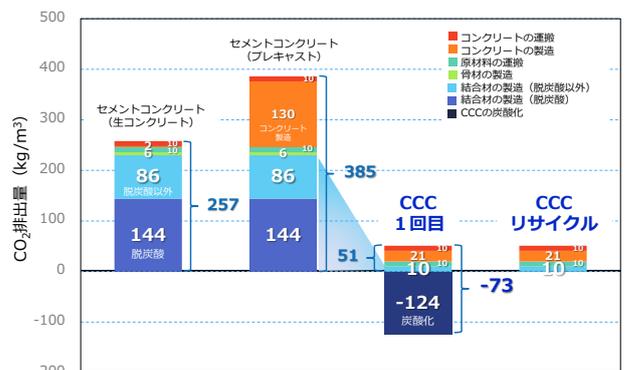


図37 CCCのカーボンニュートラル性

6.1.2 CCC の社会実装（構造材料として）

この技術は、セメント産業が石灰石の脱炭酸で大気中に放出したCO₂を全て回収してコンクリートに戻すという技術です（図38）。日本国内では法律の壁をクリアしなければなりません。例えば2050年に半分のコンクリートがCCCで作られるようになると、世界で毎年21億トンのCO₂排出削減につながるようになります。

CCCの社会実装（構造材料として）

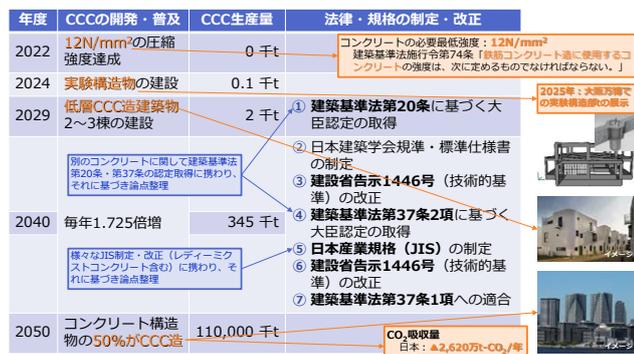


図38 CCCの社会実装（構造材料として）

6.1.3 CCCによるCO₂とCaの循環

大気中にはこれまでセメント生産時の脱炭酸によって排出されたCO₂が550億トンあります。この550億トンを全部回収するのがCCCであり、一度回収したCO₂は、それ以降大気中に放出しないということになります（図39）。

cccによるCO₂とCaの循環

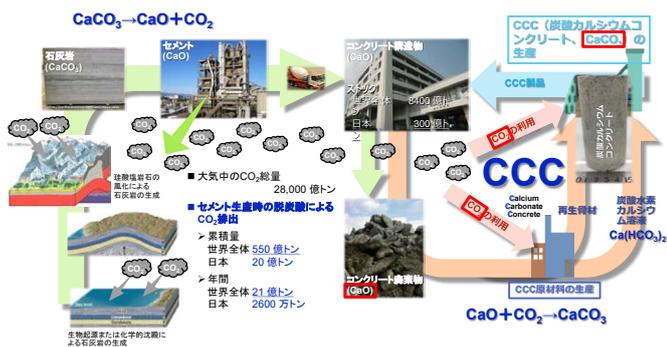


図39 CCCによるCO₂とCaの循環

6.2 火星でのコンクリート製造

ちなみに、CCCの技術は火星でも使用可能です（図40）。火星はCO₂が豊富であり、さらにカルシウムよりマグネシウムが多いということが分かっています。マグネシウムとCO₂も容易に結びつくため、火星でも同様に炭酸マグネシウムコンクリートが製造可能です。実際に実験を行ない、小さなブロックも製造できたため（図41）、この技術を使用して火星の基地が作れるのではないかと研究が発表されています。

火星でのコンクリート製造（番外編）

■ 2030年代の火星有人探査ミッション

- 探査拠点用建築物の建設
- 建設材料の輸送コスト：現地調達・製造できる材料
 - ◆ レゴリスの熔融、サルファコンクリート、ジオポリマー
 - 高温の製造工程
 - 現地での材料入手性困難



■ 炭酸マグネシウムコンクリート(MCC)の製造

	原料	入手可能性
重炭酸溶液	水または氷	地下水や氷床として地盤内や極地方に存在 ¹⁾
	炭酸塩鉱物	炭酸マグネシウム (Magnesite) ²⁾
	炭酸イオン源	大気中のCO ₂
骨材	表層土 (レゴリス)	表面のレゴリスは玄武岩質 ³⁾

¹⁾ Hazari Shrabani M. et al.: Water on Mars: A literature review, Galaxies, Vol. 8, No. 2, Jun. 2020
²⁾ Horgan H. N. B. et al.: The mineral diversity of Jezero crater, Evidence for possible lacustrine carbonates on Mars, Icarus, Vol. 339, No. 113126, 2020
³⁾ McKeown H. V., Taylor G. J., and Wyatt M. B.: Elemental Composition of the Martian Crust, Science, Vol. 124, No. 3038, pp. 736-739, 2009

図40 火星でのコンクリート製造（その1）

火星でのコンクリート製造（番外編）

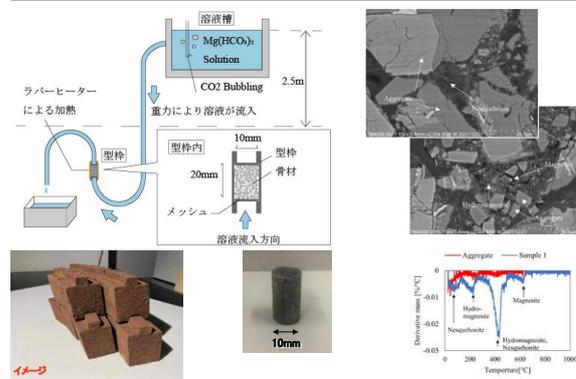


図41 火星でのコンクリート製造（その2）

7 カーボンニュートラルコンクリートの社会実装に向けて

7.1 標準化・規格化の動向

社会実装するにあたっては、建設業界ではJISやISOのような標準化・規格化が必要となります。炭酸化したコンクリート、CO₂を吸収するコンクリートについても同様であり、評価する仕組みと、それらを社会実装するために「標準的なコンクリートはこうやって作り施工すべきです」というISOが必要になってきます。今まさにそれを作ろうとする動きがありますが、既に制定されているISO 13315-8は「作った製品の性能をどのように表示するのか」を定めたものです。

ISO 13315-8は、エコマーク、エコリーフなどと同様に、製品のCO₂の排出量・削減量・固定量を算出し、第三者の認証を受けて表示する仕組みです（図42）。図中のA-1、A-2にあたる部分は、設計者・使用者にとってはScope3となり、材料を作る人、コンクリートを作る人は、カーボンフットプリントを表示することが求められます。また、BIMやCIMと組み合わせ、CO₂の排出量・削減量・固定量を情報として盛り込むことができれば、構造物を造る際に「どれぐらいCO₂が吸収固定されているのか、排出されているのか」が自然に計算されるようになると予想されます。

標準化・規格化の動向

■ ISO 13315-8 (Environmental labels and declarations)

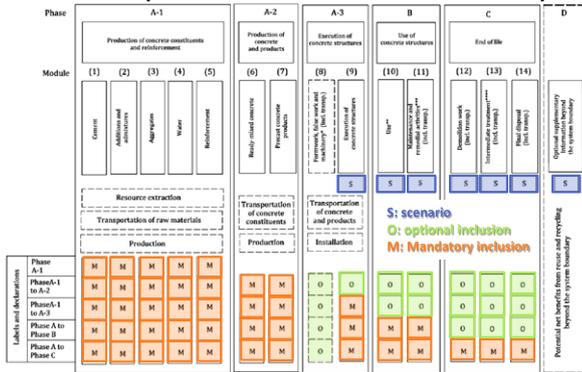


図 42 標準化・規格化の動向

7.2 インベントリの正しい評価

インベントリを正しく評価するためには、自己適合宣言型ではなく、第三者が証明する必要があると考えています (図 43)。そのためには、まず、コンクリートを作る過程における CO₂ の排出・固定を第三者認証という形にしていくべきではないでしょうか。

インベントリの正しい評価

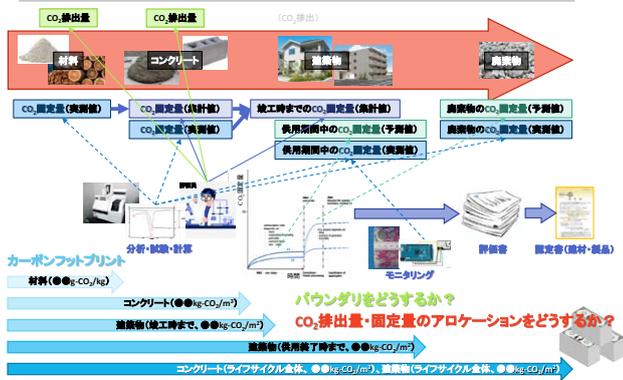


図 43 インベントリの正しい評価

ここで問題となるのは、建築物や土木構造物は供用時も CO₂ を吸収固定しているということです。将来的には構造物による CO₂ の吸収固定が構造物のメリットになる可能性はあるものの、カーボンクレジットのようなものを検討が不十分な状態で導入すると、問題が発生するかもしれません。なぜならば、クレジットは恐らく竣工時に与えられると考えられますが、寿命を待たずに解体されたり、計算通りに CO₂ を吸収しなかったりするケースも考えられ、その際にはクレジットの返還が求められることが予想されるからです。クレジットを受けた企業が何十年も先に存続しているかどうかはわかりません。そのため、建築物・土木構造物が竣工した時点からモニタリングを継続する必要があります。実際、モニタリング技術も GI 基金事業で検討されているのが現状です。このように、CO₂ がお

金と関係すると、それがインセンティブとなり、設計・施工において必須項目化していくことになります。そのため、今後は開発行為が CO₂ 志向に大きく変わっていくと考えています。

現在、建築物の場合はエコまち法 (都市の低炭素化の促進に関する法律) や LCCM (ライフ・サイクル・カーボン・マイナス) 住宅の認定のように、評価が構造物単位でなされています。これら評価において材料やコンクリートの CO₂ データが必要となるため、データは第三者認証されたものであるべきと考えます。

7.3 建築基準法への適合

JIS や ISO と並ぶ問題の 1 つに法律の壁があります (図 44)。現在、建築物の主要構造部等に使用できるコンクリートは、セメントを用いた狭義のコンクリートに限られています。セメントとは、JIS に適合するセメントのことです。しかし、これまで述べてきた通り、セメント不使用の広義のコンクリートは数多く開発されてきています。建築材料についての大蔵大臣認定を取れば構造用途で使用可能なのですが、建築基準法第 37 条に基づく大臣認定は、セメントを使用していないコンクリートはコンクリートではないと判断されるため大臣認定を取得できません。そのため、まずは同法第 20 条に基づく構造認定の取得を目指す必要があります。その後、建築材料についての大蔵大臣認定を取得できるようにするために、同法第 37 条や関連告示を改正する必要があります。これらが実現して初めて、自由にカーボンニュートラルのコンクリートが使える世界が広がることとなります。

建築基準法への適合

- 第 37 条、告示 1446 号
 - 建築物の主要構造部等に使用するコンクリート
 - ◆ JIS A 5308 (レディー・ミクスト・コンクリート) に適合するもの
 - ◆ 国土交通大臣の認定を受けたもの
 - ▷ セメントの品質・組成
 - ▷ 骨材の品質
 - ▷ 圧縮強度の基準値
 - ▷ スランプ・スランプフローの基準値
 - ▷ 空気量の基準値
 - ▷ 塩化物含有量の基準値
- 第 68 条の 25
 - 構造方法等の認定
- 第 20 条、施行令第 81 条・第 36 条
 - 高さ 60m 超
 - ◆ 時刻応答解析
 - ◆ 耐久性等関係規定 (材料、強度、養生、型枠除去、かぶり厚さなど)
 - 高さ 60m 以下
 - ◆ 保有水平耐力計算、限界耐力計算、許容応力度計算
 - ◆ 耐久性等関係規定 (材料、強度、養生、型枠除去、かぶり厚さなど)、仕様規定

↑ Yes の場合 ↑ No の場合
 カーボンニュートラルコンクリートは、コンクリートか?

図 44 建築基準法への適合

7.4 真のカーボンニュートラルコンクリート

では、晴れてカーボンニュートラルコンクリートが不自由なく利用できる世界が実現した場合、それを永続的に使用するためには何が必要になるのでしょうか (図 45)。まず、構造物の建設には大量の材料が必要になるため、カーボンニュートラルコンクリートは経済的でなければなりません。コンクリートは現在 1 立方メートルあたり 1~2 万円程度です。その値段でカーボンニュートラルコンクリートも使用可能な状態にする必

要があるでしょう。また、木材のように持続可能である必要もあります。木は成長する過程でCO₂を吸い、成長した木は伐採され建築材料などとして利用されています。木の成長期間と木材の使用期間はそれぞれ50～100年であり、バランスが取れています。また、木は量的にも十分な資源であるといえます。さらに、カーボンニュートラルであるためには地産地消も重要です。なぜなら、廃コンクリートを再生工場に長距離移動させるのは現実的ではなく、エネルギーもコストもかかるためです。コンクリートは、セメント生産時に排出されるCO₂から炭酸カルシウムが作られ、その炭酸カルシウムがコンクリートで用いられれば循環する形になるので、カーボンニュートラルにはなり得ます。では、どのようにその仕組みを作っていくのか。これは、技術者だけではなく政策立案者も考えるべき事であると考えます。ただ、1つの懸念点が、アルカリ性ではないコンクリートが生じる可能性です。アルカリ性でなければ鉄筋を使用することは不可能です。そのため、新しい構造形式の開発に向けた研究も必要となってきます。

真のカーボンニュートラルコンクリート

- 経済的でなければならない
- 木材のように持続可能でなければならない
 - 十分な資源量があること
 - 原料と製品は量的にバランスしていること
 - 全ての構成物が循環できること
 - 地産地消であること
- 新たな構造形式の開発も必要である
 - 現在の工法・構造形式が利用できる方がよいが

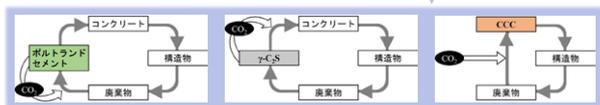


図 45 真のカーボンニュートラルコンクリート

7.5 “White Carbon” による CCUS

地球には、CO₂を吸収する2つの大きな仕組みがあります(図46)。1つはグリーンカーボンと呼ばれ、年間約100億トン吸収されると考えられています。もう1つのブルーカーボンの吸収は年間約50億トンとされています。こうした中、コンクリートの吸収量はいかほどでしょうか。結論を先に言えば、約10億トンがコンクリートによるCO₂吸収となります。現在、世界全体でセメントが約40億トン生産されていますが、将来、そのセメントを用いて建設された構造物が解体されて発生する廃コンクリートによって10億トンのCO₂が吸収されるという試算は、大きくは間違っていないと思います。これだけ大きな数量であるので、ブルーカーボンやグリーンカーボンと並び称されるために「ホワイトカーボン」と命名しました。2050年のカーボンニュートラル化に向けて、コンクリートはCO₂固定源として期待されています。「ホワイトカーボン」という呼称が一般化されるべく、コンクリート業界の人のみならず、建設業界、一般の方々もご協力をいただければ幸いです。

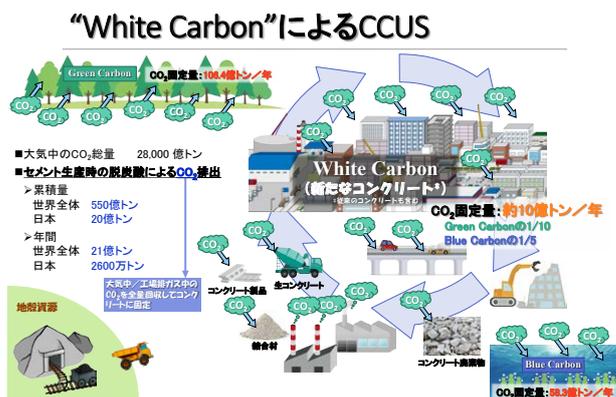


図 46 “White Carbon” による CCUS

8 質疑応答

【質問者】

日本の企業だけでなく、アメリカやイギリス等の企業も様々な研究開発をしているとのことでしたが、今、世界的に見てこの分野における日本のポジションはどのあたりにあるのでしょうか。

【野口氏】

冷静に見て、日本の技術は、世界で開発されている技術とほぼ同等と言えると思います。社会実装の点でも、恐らく同じような状態でしょう。セメント生産におけるCO₂利用は始まったばかりですが、混和材や骨材等は海外と同じように研究開発が進んでいます。CO₂と反応して固まるセメントに関しては日本が少しだけ先んじている気もしますが、アメリカでも同様の技術は存在します。C⁴Sのような特殊なものに関しても、炭酸カルシウムのバテライトをアラゴナイトに変える技術など、近い技術開発であると考えられるので、日本の技術は世界とほぼ同等という状況です。しかし、世界から届くニュースを見ている限りでは、日本からの発信が少し弱いと感じます。日本国内ではよく聞くものの、世界のニュースの中で日本の技術が取り上げられることが少ない。そのため、是非海外発信を進めていくべきであると思います。

【質問者】

ホワイトカーボンは土木建築・建設技術者にとって非常に夢のある話であり、これまで自然破壊の象徴とされていたコンクリートが、地球環境を救うヒーローになり得るんだということだと思います。こういう考え方を世の中に広めていくためには、どのようなやり方があるのか。様々な方と話し合ってきたと思いますので、その中で最も夢物語みたいなものがあれば、ぜひお話しただければと思います。

【野口氏】

夢物語というよりも笑い話に近いかもしれませんが、将来に関する技術なので、若い人が向いてくれるもの、YouTube等、最近の若い人が利用するSNSの活用は重要だと思います。「コン

「コンクリートはこんなに役に立つんだ」ということが、子供の頃から認識されるようになるということが重要で、そうすると、SDGsを世界に広めたピコ太郎のYouTubeのように、ホワイトカーボンやコンクリートを面白おかしく発信できればいいと思います。なおかつ「これは地球環境に非常に貢献するんだ」さらには「安全安心を提供する」という点がきちんと報道されるように工夫できればよいと思います。建設業界が作るCMには真面目なものが多いですね。なので、もう少しウケを狙ったCMがあってもよいのではないのでしょうか。私も時々テレビ出演の依頼をされたりしますが、NHK系が多いので真面目な世界です。しかし、もう少し砕けたところで、皆さんが共感を覚えてくれるようなものもあってよいのではないのでしょうか。もともと真面目な建設業界の人間は、前面に立ちたがらない。エンジニアの世界では少し控えめであることを良しとしている。そんな世界をどなたかが先頭に立って変えていっていただけるとよいと思います。

【質問者】

標準化・評価の部分は非常に大事だと思います。しかし、ヨーロッパやアメリカと日本とでは立ち位置が微妙に異なり、様々な思惑があると思うのですが、カーボンニュートラルの評価の標準化を議論するにあたって、各国の動きはどういったものなのでしょうか。

【野口氏】

やはりヨーロッパ系はある意味で熱心です。しかし、欧州にはENがあり、彼らはENの世界で良しとしてしまう傾向があります。ENが先行して規格を作ってしまうとそれで終わり。ウィーン協定に則ってISOと一緒に作ろうとしても、彼らは彼らだけの閉じた世界で作っているのだから、ISOを作ろうとすると反対されることもあります。アメリカの場合、彼らの言い分は「コンクリートはCO₂を排出していない」です。なぜなら、アメリカにおけるコンクリートのCO₂排出量は、総排出量の約2%だからです。そのため、コンクリートはアメリカの産業の中ではCO₂の排出がないと考える傾向にあり、本気で対策に乗ってこないところがあります。ただし、技術開発だけはきちんと進めているという状況です。大まかにいえば、2つに分かれてしまう。「とにかくCO₂を削減しましょう」というグループがある一方で、いざ社会実装するという時には、大多数の人達に「そんなに排出してないんですよ」という気持ちがあったりする。実際、「コンクリートはCO₂をあまり排出しない上に、長持ちする。なので、世の中にとって非常にいい材料です。」という言い方もされました。

評価については、実は、様々な国が手を挙げ始めている状況です。私は「日本から発出しなければいけない」と思っているのだから、こういう状況を受けて、JISを来年には制定し、ISO化もすぐにとりかかろうという方向に舵を切りました。本来はもう2～3年おいてからと思っていたのですが、実態としてはそういう状況です。

【質問者】

国際標準の中で評価という部分はすごくウエイトが高いと思

います。一方で、電化製品や車のようなものの場合、「VHSとベータ」のように全く層の違う議論をされる可能性があります。その点、コンクリートは基本的に歴史があって同じような化学反応をしているとは思いますが、評価の中でも「VHSとベータ」のような議論はあり得るのか、それとも結論はおおむね決まっているので、国によって受ける影響は少ないのか。その辺の基礎知識がない部分も含めて、何かコメントいただければと思います。

【野口氏】

コンクリートそのものに関して言うと、セメントは基本的にどこの国も同じようなセメントを使っています。ただし、セメントに加える混合物が国によって大きく異なるという状況もあり、「セメントのISOがない」というのがその象徴となっています。また、ENにはセメントの規格があるものの、10を超える数の規格になっています。一方で、評価の方法に関しては、使用する分析機器が日本と海外でほぼ同じ。我々も日本の企業が製作している分析機も、輸入したのも同じように使っています。そこの差異は値段が少し違う程度。どちらが先端的な技術なのか、そういう意味ではベータとVHSの違いのようなものはないと言えると思います。先ほど説明した、湿式分析なのか熱分析なのかという話に関して、我々も「どっちがいいんだろうか」程度の気持ちです。A法、B法など言いながら両方とも使い続けられれば、自ずとどちらが主流になるのかが決まってくると思います。コンクリート中のCO₂固定量を正確に評価できるより先端的な方法が開発されれば、おそらくそちらの方向に流れていくでしょう。他の国からどういう方法が出てくるのかという点に関しては、まだ情報収集できていないのですが、今後手を挙げて「ISOにしたいです」という国が出てきそうです。日本の方式を可能ならばそれと整合させたいので、日本が先に提案するというのが望ましいかなと思います。

【質問者】

アルカリ性ではないコンクリートと鉄筋以外の組み合わせについては研究されている材料はあるのでしょうか。

【野口氏】

まだ具体的に進んでいるわけではないですが、鋼材以外で既に研究が進められているのは、炭素繊維やアラミド繊維などを用いたFRPです。おそらくこれらを使用していくことになるのではないかと思います。工場製品主体になってきた時にどうやって構造物を造るのかという点では、今ある技術の中ではプレストレス系が有力候補かなと思います。

本内容は2022年9月28日に開催した国土政策研究所講演会においてご講演いただいたものです。

本講演を映像でご覧になれます。

■国土技術研究センターのYouTubeチャンネル

