

◇ 総 説 ◇

炭酸化によるセメント系材料のCO₂吸収固定CO₂ Sequestration by Carbonation of
Cement-based Materials

兵 頭 彦 次*, 星 野 清 一**,
平 尾 宙***, 野 村 幸 治****

HYODO, Hikotsugu*; HOSHINO, Seiichi**;
HIRAO, Hiroshi***; NOMURA, Koji****

要 旨

セメント系材料は、炭酸化にともなって二酸化炭素(CO₂)を吸収し安定的に固定する。気候変動に対する社会の認識が高まりつつあるなか、近年、セメント系材料が持つこのような特性は、新しい技術アプローチとして関心が高まっている。本稿は、炭酸化にともなうセメント系材料のCO₂吸収固定に関する近年の研究動向を調査し取りまとめたものである。まず、炭酸化現象を概説するとともに、ライフサイクルを通じたコンクリートのCO₂吸収量評価および炭酸化養生によるCO₂固定化技術を取りあげた。

キーワード : セメント系材料, 炭酸化, CO₂吸収, ライフサイクル, 炭酸化養生

* 中央研究所 CO₂リサイクル技術グループ CO₂ Recycling Technology Group, Central Research Laboratory

** 中央研究所 企画管理部 研究推進チーム Planning & Administration Department, Central Research Laboratory

*** 中央研究所 第一研究部 部長 General Manager, R&D Department I, Central Research Laboratory

**** 中央研究所 CO₂リサイクル技術グループ リーダー

General Manager, CO₂ Recycling Technology Group, Central Research Laboratory

ABSTRACT

Cement-based materials spontaneously uptake carbon dioxide (CO₂) due to carbonation. Once the CO₂ is sequestered in the cement-based materials, it will not be released to the atmosphere again. Recently, this property is highlighted as a new technological approach, in the face of growing societal demand on CO₂ emissions reduction. This paper summarized recent studies on CO₂ uptake and sequestration by carbonation of cement-based materials. It includes an area of studies on mechanism of carbonation, an estimation method for CO₂ uptake from atmosphere during concrete life-cycle and an accelerated carbonation curing technologies for cement based materials.

Keywords : *Cement based materials, Carbonation, CO₂ uptake, Concrete life-cycle, Carbonation curing*

1. はじめに

炭酸化は、二酸化炭素(CO₂)がセメント系材料(モルタル、コンクリート等)の中に拡散するとともに水和物と反応し、主に炭酸カルシウムを生成する化学反応である。炭酸化することにより、本来、アルカリ性であるセメント硬化体は中性に近づく。中性領域が内部の鋼材に達すると、鋼材の不動態被膜が失われ、耐食性の低下につながるため、古くから鉄筋コンクリートの耐久性問題として認識されていた。

一方、気候変動に対する社会の認識が高まりつつあるなか、近年、セメント系材料がCO₂を吸収し炭酸塩固定化する側面を捉えた新しい技術アプローチに関心が集まっている¹⁾。かつて、コンクリートの炭酸化養生は、蒸気養生に替わる促進養生方法として検討されたが、改めてCO₂を安定的に固定化する方法として注目されている。炭酸化養生することにより、通常のコンクリートよりも大幅にCO₂を固定化できる新しいコンセプトのセメント系材料が開発され、実用化されつつある。また、コンクリート建造物が供用され、その後、解体・再利用するライフサイクルのなかで、大気中のCO₂を吸収する量を算定評価する方法が世界的に議論されている。コンクリートは、水に次いで世界で2番目に年間消費されている物質であり、その膨大なストックは、CO₂の吸収固定化の点で極めて大きなポテンシャルを有している可能性がある。

本稿は、炭酸化にともなうセメント系材料のCO₂吸収に関する近年の研究動向を調査し、取りまとめたものである。まず、セメント系材料の炭酸化現象を概説した。次にライフサイクルを通じたコンクリートのCO₂吸収量評価および炭酸化養生によるCO₂固定化技術に関する最近の研究動向について記述した。最後に、この分野における今後の研究開発の展望について述べた。なお、本稿ではセメント系材料の炭酸化を対象としているが、技術用語として「中性化」を一般的に利用する事項についてはこれを用いた。

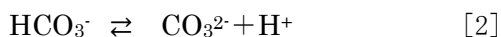
2. コンクリートの炭酸化

2.1 炭酸化の化学反応

硬化コンクリート中では、セメントはC-S-Hや水酸化カルシウム(CH)、またエトリンガイト(Aft)やモノサルフェート(AFm)といった水和物の形で存在している。コンクリート中のセメントペースト部分では、例えば普通セメントの場合、C-S-Hが55~65%、CHが15~25%、AftやAFmなどのカルシウムアルミネート水和物の含量が10~15%の割合で構成されており、またこれら水和物は一般には硬化コンクリート中で非常に安定的に存在している。一方で、セメント水和物は、いずれも化学成分として酸化カルシウム(CaO)を含む鉱物であり、**Table 1**に示すようにCO₂と反応の媒体となる水分(H₂O)が存在した場

合(**Table 1**中では, H_2CO_3 として表記)には, 反応は容易に右へと進行し炭酸カルシウム(CaCO_3)を生成する. 生成した炭酸カルシウムは, 硬化コンクリート中では一般に安定であり, その結果 CO_2 は長期にわたって固定される.

炭酸化の反応過程では, まず CO_2 が水に溶解して炭酸水素イオン(HCO_3^-)を形成する(式[1]). CO_2 は中性である水と接触すると炭酸水素イオンを形成するが, コンクリートの空隙水はpHが高いため, その結果高pHにおいてより安定な炭酸イオン(CO_3^{2-})を多く生成することになる(式[2]). この炭酸イオンがセメント水和物から供給されたCaイオンと反応することで, **Table 1**に示す反応が進行し, 炭酸カルシウムが結晶として析出する.



Lagerblad²⁾によって示されている炭酸化過程における硬化体中の水和物相の変化を**Table 2**に示す.

炭酸化の過程では, まずCHが溶解し炭酸カルシウムを生成するが, このプロセスはCHがすべて消費されるまで継続する. この間, CHの存在によって空隙水のpHは12.4以上と高い状態が維持されており, 高pHにおいて安定なC-S-HやAFt, AFmなどのセメント水和物は安定的に存在している. CHが完全に消費されると(First stage ~ Second stage), 空隙水のpHやCaイオン濃度が低下しはじめる. その結果C-S-Hは, Caの溶脱が進行し, Ca/Si比が低下する. さらにpHが低下すると, C-S-HのCa/Si比の低下が継続的に進行すると同時に, pHが11.6以下(Second stage ~ Third stage)ではAFmが, pHが10.5以下(Third stage ~ Carbonated)ではAFtが分解してCaイオンを放出し, 炭酸イオンと反応して炭酸カルシウムを生成する. その際, AFmやAFt(ここではFeを含むものとして仮定)からは $\text{Al}(\text{OH})_3$ ゲルや $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ゲルが生成され, その結果完全に炭酸化した硬化体(Carbonated)では, 理論的には炭酸カルシウムのほか, 一定量のCaOを含むシリカゲル(SH)や $\text{Al}(\text{OH})_3$ ゲル, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ゲルが生成する.

Table 1 Carbonation reaction of cement hydrates
(セメント水和物の炭酸化反応)

Cement hydrates	Carbonation reaction equation
C-S-H	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
Ettringite (AFt)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O}$
Monosulfate (AFm)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{CaSO}_4 + 12\text{H}_2\text{O}$

Table 2 Phase changes in the carbonation process
(炭酸化過程における硬化体中のセメント水和物の相変化)

Intact concrete	First stage	Second stage	Third stage	Carbonated
CH	---	---	---	---
C-S-H (1)	C-S-H (1)	C-S-H (2)	C-S-H (3)	SH (with some CaO)
	CaCO_3	CaCO_3	CaCO_3	CaCO_3
AFm	AFm	AFt/ $\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Al}(\text{OH})_3$
AFt	AFt	AFt	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
pH > 12.5	pH < 12.5	pH < 11.6	pH < 10.5	pH < 10

Where C-S-H(1) = C-S-H(2) + CH and C-S-H(2) = C-S-H(3) + CH,
Ca/Si ratio is C-S-H(1) > C-S-H(2) > C-S-H(3).

2.2 炭酸化の進行

コンクリートの炭酸化の進行は、構造的にはCO₂の拡散と、拡散したCO₂の空隙水への溶解などが相互に影響しあうことによって生じる。一方で、実用上においては、炭酸化の経時的な進行は拡散に基づく部分も大きいことから、表面からの炭酸化領域の進行は、物質の拡散に関する基本法則であるFickの第1法則にしたがうものと仮定され、この法則から導かれるいわゆる \sqrt{t} 則(式[3])によって近似される。

$$D = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad [3]$$

ここに、

D : 中性化深さ, α : 中性化速度係数, t : 時間

これまでの研究によって、中性化深さの経時的な進行はこの \sqrt{t} 則に近い形で進行することが確認されている。一方で、中性化深さの進行の速さは、コンクリートの配合や環境条件などさまざまな要因の影響を受ける。この点を考慮し、これまでコンクリートの中性化深さを近似する式としては、各要因の影響を係数として取り入れた多くの式が提案されている。中性化の速度式の代表例として、土木学会のコンクリート標準示方書³⁾では、式[3]の中性化速度係数(α)を式[4]とした式が、また日本建築学会鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説⁴⁾では、中性化速度係数を式[5]とした式が示されている。これらの式では、水セメント比などのコンクリートの基本的な配合条件や混和材の影響、環境条件の影響などが考慮されたものとなっている。また、これらの式以外にも、各要因の影響を考慮した式として、岸谷ら⁵⁾や白山ら⁶⁾、和泉ら⁷⁾の式など多くの式が提案されている。

土木学会 :

$$\alpha = (-3.57 + 9.0 \cdot W / (C + kA_d)) \cdot \beta_e \quad [4]$$

ここに、

α : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

W, C, A_d : 単位体積当たりの水, ポルトランドセメントおよび混和材の質量

k : 混和材により定まる定数

β_e : 環境作用係数

建築学会 :

$$\alpha = 17.2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad [5]$$

ここに、

α : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

$a_1, a_2, a_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$:

それぞれ骨材, セメント, 水セメント比, 気温, 湿度・水分, CO₂濃度による係数

2.3 炭酸化に影響を与える因子

構造的な観点からみた場合、コンクリートの炭酸化深さの進行に影響を与える大きな要因としては、拡散に係わる要因とCaO量に係る要因が挙げられる⁸⁾。これは、CO₂の硬化体中への浸透の量や速さは拡散によって決まる部分が大きく、またCaO量は硬化体表面から浸透したCO₂が表面から順次捕えられる量に影響を与えるためである。以下に挙げる因子の中には拡散とCaO量の両者に影響する因子もあり、必ずしも明確には区別はできないものの、コンクリートの特性や環境条件の面からみた場合、前者の拡散に影響を与える因子としては、コンクリートの水セメント比や骨材の種類、混和剤の添加などといった配合的な要因や、養生条件、またそれらの結果として生じる硬化体組織の構造などが挙げられる。さらに、コンクリート硬化体が曝される温度や湿度、湿潤の有無、CO₂濃度などの環境条件も挙げられる。また、後者のCaO量に影響をおよぼす因子としては、セメントの種類や、混和材の有無および添加量などが挙げられる。これらに例示されるように、コンクリートの炭酸化は非常に多くの因子の影響を受ける。

(1) 水セメント比および空隙率の影響

コンクリートの炭酸化は、前項のとおりCO₂が硬化体中の空隙を通じて内部に拡散していくことによって生じる。したがって炭酸化の進行は硬化体組織の緻密さの影響を大きく受け、組織が緻密であるほどCO₂が硬化体内部に拡散しにくく、炭酸化の進行は遅くなる。また、コンクリートの配合の観点からみた場合、組織の緻密さに最も影響を与えるのは一般には水セメント比(W/C)であることから、その影響に関してはこれまで非常に多くの報告がなされている。水セメント比の影響の一例としては、代表的には式[4]、[5]に示す土木学会式や建築学会指針式があり、このうち建築学会指針式では水セメント比の影響を考慮した係数(a_3)として、 $a_3 = W/C - 0.38$ といった関係が示されている。これらの式では炭酸化の進行は、水セメント比の変化に対して一次関数的な影響を受けるものとして近似されている。

また、空隙径分布に代表されるような硬化体の空

隙構造と炭酸化の進行速度との関係についても非常に多く報告されている。それら報告では、粗大な空隙の量が多くなるほど炭酸化の進行が速くなるとの報告が多くみられている⁹⁾¹⁰⁾。また全体的には、硬化体の組織が緻密になり、空隙率が低下するほど炭酸化の進行が遅くなるのが一般的な傾向として認められている。

(2) 湿度および水分の影響

炭酸化の進行は、湿度や水分の状態などの影響を受ける。セメントペースト部分の空隙壁面や空隙中では、元々のコンクリートの練り混ぜ水を起源とする自由水や、外部環境から硬化体中に侵入した湿分による水が存在している。炭酸化の反応では、外部から硬化体中に拡散したCO₂が、前述した式[1]、[2]の反応によって空隙周辺の水に溶解した後、セメント水和物と化学平衡的に反応して炭酸カルシウムを生成する。外部環境の相対湿度が高い場合、もしくは硬化体が水中に置かれていたり、水掛りがある環境に置かれている場合には空隙内が水で満たされた状態となる。この場合、CO₂の硬化体内部への拡散は阻害され、炭酸化の進行は非常に遅いものとなる。一方で、相対湿度が低い場合には、反応の媒体として必要な水が空隙内にほとんど存在しない状態となるため、炭酸化の反応が起こりにくくなる。その結果、炭酸化の進行は相対湿度50~70%前後の条件下において最大となり、それよりも相対湿度が高くて、低くても炭酸化の進行は遅いものとなることが多くの研究によって確認されている。

(3) 温度の影響

温度の影響については、一般に温度が高くなるほどCO₂の硬化体中への拡散速度が速くなることから、炭酸化の進行も速くなるとされている。温度の影響については、例えば式[6]の関係が和泉ら⁷⁾によって示されており、また本式を元に建築学会指針式における気温を考慮するための係数 β_I が例示されている。

$$\beta_I = 0.017 \cdot T + 0.48 \quad [6]$$

ここで、 β_I : 温度の影響係数、 T : 温度(°C)

(4) セメント種類の影響

炭酸化の進行は、セメントの種類によっても大きく影響を受ける。これは、硬化体外部から内部に向

かって拡散したCO₂は表面近傍のCaOから順次反応するものと考え、CaO量が多い硬化体ではより多くのCO₂が硬化体内部に拡散するまでに表面に近い部分で捕らえられることとなり、結果としてCO₂の浸透速度、すなわち炭酸化の進行は遅くなる⁸⁾。セメントの種類と炭酸化速度の関係を表わす結果として、Krenkler¹¹⁾はセメントのC₃S(エーライト: 3CaO·SiO₂)量と相対炭酸化深さの関係を示している。セメントのC₃S量は高炉セメント、普通セメント、早強セメントの順で多くなるが、C₃S量が多くなるほど相対的な炭酸化深さは一次関数的に小さくなることを示している。

また建築学会指針⁴⁾では、CHが炭酸カルシウムを生成するものとして、各セメントのC₃S量とC₂S(ビーライト: 2CaO·SiO₂)量から、水和によって生成するCH量を理論的に計算し、そのCH生成量からTable 3に示す各セメントの中性化比率(普通ポルトランドセメントを1とした時の炭酸化の比率)を示している。CH生成量はCaO量に依存するものと考えられることができるが、本表によるとCH生成量から求めた中性化比率は、早強セメントが最も小さく、混和材を混合した高炉セメントやフライアッシュセメント(FA)では大きい。また混和材の混合量が多くなるほど炭酸化が速く進むことが示されている。

Table 3 Carbonation ratio by types of cement
(各種セメントの中性化比率)

Types of cement	Admixture content (%)	CH production rate per unit amount of cement ^(*) (%)	Carbonation ratio
High-early-strength	---	33.7	0.95
Moderate-heat	---	28.5	1.03
Low-heat	---	25.4	1.09
BA	30.0	21.2	1.2
BB	45.0	16.7	1.35
BC	70.0	9.1	1.82
FA	10.0	27.2	1.06
FB	20.0	24.2	1.12
FC	30.0	21.2	1.20

- Carbonation ratio is the value when Ordinary Portland Cement is 1.

- BA, BB, BC: Portland Blast-Furnace Slag Cement.

- FA, FB, FC: Portland Fly-Ash Cement.

(*) Obtained value from theoretical content of C₃S and C₂S.

(5) 炭酸化度

コンクリートのCO₂吸収量に対しては、セメント水和物の炭酸化度、すなわち炭酸化によってセメント水和物中に含まれるCaOのどの程度の割合が炭酸カルシウムになるかの指標も重要となる。炭酸化度は、セメント水和物の種類や炭酸化の際の環境条件によってある程度決まる可能性もあり、実際の現象のうえでは必ずしもコントロールできる因子ではない可能性もある。一方で、コンクリートのCO₂吸収量の算定の際には、一般に炭酸化度を用いた式[7]などが用いられるが、この炭酸化度の見込みによってCO₂吸収量の算定結果は直接的な影響を受けることになる。

$$A_{up} = Y_c \times \frac{C}{1000} \times \frac{CaO}{100} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad [7]$$

ここに、

A_{up} : コンクリートの中酸化領域 1 m³あたりにおけるセメントのCO₂吸収量(t-CO₂/m³)

Y_c : 炭酸化度

C : コンクリートの単位セメント量(kg/m³)

CaO : セメントのCaO量(%)

M_{CO_2} : CO₂のモル質量(=44.0g/mol)

M_{CaO} : CaOのモル質量(=56.1g/mol)

炭酸化度については、例えば Lagerblad²⁾らは、CH中のCaOの全量と、C-S-H中およびAFt、AFm中の

CaOの50%が炭酸化によって炭酸カルシウムを生成するものと仮定して、その値は約0.75になると見積もっている。また、その他にも0.5とする報告¹²⁾や、0.8と見込んだ報告¹³⁾がある。米国のPortland Cement Association(PCA)では、コンクリート硬化体中のCHのみがCO₂の固定に寄与するものとして、炭酸化度としておよそ0.35~0.37を仮定しコンクリートのCO₂吸収量の算定を行っている¹⁴⁾。2017年に制定されたEN 16757の附属書(AnnexBB)では、参考(informative)として、CO₂吸収量の算定の際に用いる環境別およびコンクリートの強度別の中性化速度係数(k-factor)とともに、炭酸化度が示されている(**Table 4**)。これによれば、炭酸化度は、乾燥状態にある屋内では40%(0.4)と小さく、雨掛かりのある土木構造物や建築物では85%(0.85)と大きな値が設定されている。

3. 炭酸化によるCO₂吸収・固定に関する研究動向

3.1 概要

コンクリートはCO₂を吸収し、安定的に固定する性能を有していることは、2章で述べたとおりである。このような効果を、植生や土壌による大気中のCO₂吸収と同じ概念に組み込み、「カーボンシンク」としての効果を明らかにしようとする研究が進めら

Table 4 k-factors for calculation of depth of carbonation for different concrete strength classes and exposure conditions and degree of carbonation (EN 16757 Annex BB)
(環境条件・強度クラス別の中性化速度係数および中性化度: EN 16757 Annex BB)

Concrete strength	<15MPa	15-20MPa	25-35MPa	>35MPa	Degree of carbonation
Parameters	Value of k-factor (mm/year ^{0.5})				(%)
Civil engineering structures					
Exposed to rain		2.7	1.6	1.1	85
Sheltered from rain		6.6	4.4	2.7	75
In ground ^a		1.1	0.8	0.5	85
Buildings					
Outdoor					
Exposed to rain	5.5	2.7	1.6	1.1	85
Sheltered from rain	11	6.6	4.4	2.7	75
Indoor in dry climate ^c					
With cover ^b	11.6	6.9	4.6	2.7	40
Without	16.5	9.9	6.6	3.8	40
In ground ^a		1.1	0.8	0.5	85

^a Under groundwater level k=0.2.

^b Paint or wall paper (Under tiles, parquet and laminate k is considered to be 0.).

^c Indoor in dry climate means that the RH is normally between 45 and 65%.

れている。また、強制的に炭酸化することによってコンクリートの硬化を促進したり、再生骨材の弱点となる付着モルタルの物性を改善するなど、CO₂を固定しながらコンクリートや骨材の機能を向上させる技術などが検討されている。本章では、これらの技術を概説する。

3.2 ライフサイクルを通じたCO₂吸収量評価

(1) コンクリートのライフサイクル

生産されたセメントは、主にレディーミクストコンクリートやコンクリート製品の原料として使用される。コンクリートは建築物や社会インフラの基盤材料として数十年～百年単位で使用され、その供用期間中に部材表面からCO₂を吸収する。

供用後、時代のニーズに合致しなくなった建築物

や劣化外力等により機能を損なった構造物は、必要に応じて解体される。解体されたコンクリートは、主に再資源化施設に運ばれ、破碎、粒度調整等の工程を経てコンクリート用再生骨材や道路舗装用の路盤材に再資源化される。再資源化の過程において、コンクリートは供用中に比べて細粒化されることにより、大気との新しい接触面を形成し、急速にCO₂を吸収することが知られている。

(2) CO₂吸収量評価に関する研究

セメントおよびコンクリートのライフサイクルをFig. 1に示すようにモデル化し、ライフサイクルを通じた大気中からのCO₂の吸収量を国単位で算定する研究が、2000年ごろから海外を中心に行われている。Table 5に、最近20年間の研究事例^{13)~22)}を

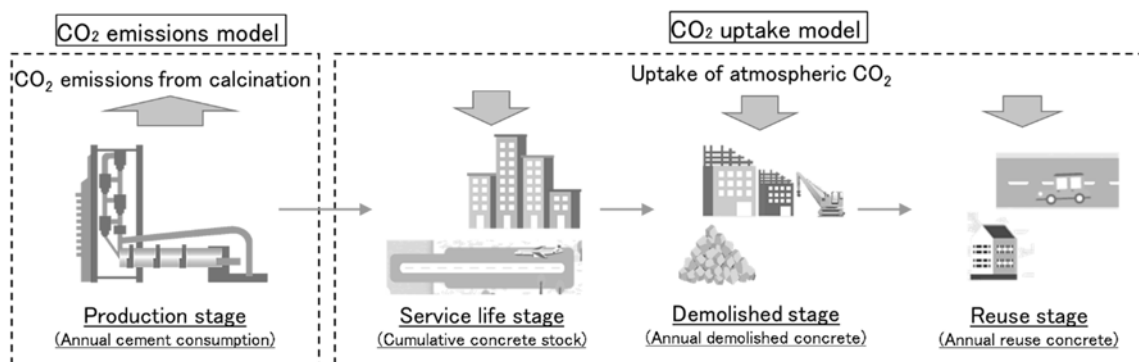


Fig.1 Life-cycle model for concrete (コンクリートのライフサイクルモデル)

Table 5 CO₂ uptake estimations of concrete presented in several papers (コンクリートのCO₂吸収量の評価結果)

Authors	CO ₂ emissions	CO ₂ uptake (%)						
		Gajda and Miller ¹⁴⁾	Jacobsen and Jahren ¹⁵⁾	Pade and Guimaraes ¹⁶⁾				Nygaard and Leemann ¹⁷⁾
Year		2000-2001	2002	2003				2012
Country		USA	Norway	DK	NO	SE	IS	Switzerland
Life cycle	Calcination	-	14-19	57	33	33	34	-
	Clinker	-	8-11	34	19	19	20	-
Service life	Calcination	7.5	-	24	16	18	28	7.5
	Clinker	4.4	-	14	9	11	17	4.4

DK: Denmark, NO: Norway, SE: Sweden IS: Iceland

Authors	CO ₂ emissions	CO ₂ uptake (%)					
		Anderson et al. ¹⁸⁾	Yang et al. ¹⁹⁾	Fitzpatrick et al. ²⁰⁾	Xi et al. ¹³⁾	Vermeulen ²¹⁾	Andrade and Sanjuan ²²⁾
Year		2013	2014	2015	2016	2017	2018
Country		Sweden	Korea	Ireland	Global study	Netherlands	Spain
Life cycle	Calcination	14-19	29-34	-	43	37	-
	Clinker	8-11	18-21	-	28	23	-
Service life	Calcination	-	10	15	-	30	11
	Clinker	-	6	10	-	19	7

示す。ここでは、コンクリートが吸収したCO₂量の程度を示す尺度として、CO₂吸収率が用いられている。これは、使用されたセメントの製造過程で発生するCO₂排出量とコンクリートのCO₂吸収量を比較するものである。基準となるCO₂排出量は、石灰石の脱炭酸由来に基づく場合と、クリンカー自体の排出量とする場合があるが、CO₂吸収率の評価では前者を基準とすることが多い。これは、ポルトランドセメントのCO₂吸収量の理論上の最大値が、脱炭酸によって排出した量と見なせるためである。表中には、①脱炭酸(Calcination)および②クリンカー(Clinker)をベースとしたCO₂吸収率を示すが、断りのない限り本報では脱炭酸ベースで議論することとする。

2000から2001年にかけて、PCAにおいて、米国の供用中のコンクリートのCO₂吸収量に関する先駆的な研究が行われた¹⁴⁾。続いて、北欧において同様の評価が行われ¹⁵⁾¹⁶⁾、ここでは供用中のコンクリートに加えて、解体されたコンクリートのCO₂吸収量が考慮された。また、炭酸化する水和物を水酸化カルシウムに限定していたPCAの研究¹⁴⁾に対し、C-S-Hやアルミネート水和物などの炭酸化も考慮された。

その後、コンクリートの供用期間や解体コンクリートの保管期間を仮定したシナリオを設定し、将来のCO₂吸収量を求めるモデルから、過去のセメント消費量、コンクリートストック量などの統計値を用いて現在のCO₂吸収量进行评估する動態モデルなどが開発された¹⁸⁾。これらの報告の多くは、国単位でのCO₂吸収量評価にとどまっているが、地球規模で評価する試みも行われている¹³⁾。ここでは、コンクリートだけでなくセメントキルンダストやモルタルによるCO₂吸収量を新たに考慮し、そのなかで、比較的薄く表面積が大きい部位で用いられるモルタルが主要なCO₂吸収要素であると評価された。

2017年に制定されたEN16757の附属書(Annex BB)に参考(informative)として、強度クラス別の中性化速度係数と、環境に応じた炭酸化度が示され、CO₂吸収量評価の規格化が進められた(**Table 4**)。また近年、IVLスウェーデン環境研究所は、それまでに提案されたCO₂吸収量算定手法を、入力情報の大小や精度レベルに応じてTier 1, 2, 3の三つのモデル分類し、IPCCへの報告形式に沿った形に再構成するとともに、各提案モデルの算定手法を正規化し、統計情報が少ない場合でも報告できるTier 1モデルを構築した²³⁾。Tier 1モデルは、式[8]~[12]に示す形で示されており、基本的な入力データは、そ

の国で1年間に消費されたセメントの脱炭酸由来のCO₂排出量となっている。これによれば、供用段階のCO₂吸収量はセメントの脱炭酸由来のCO₂量の20%、解体段階は2%、リサイクル段階は1%とされ、ライフサイクルの中でコンクリートはセメントの脱炭酸由来のCO₂排出量の23%を吸収することになる。また、モルタルの使用量や再資源化されたコンクリートの統計値がわかる場合には、CO₂吸収量を修正できるオプションも用意されている。

① 供用段階のCO₂吸収量

- i) 1年間に消費されたセメントからの脱炭酸由来のCO₂排出量(CO_{2,emi,cal})がわかる場合：

$$\text{CO}_{2,\text{uptake,use}} = 0.20 \times \text{CO}_{2,\text{emi,cal}} \quad [8]$$

- ii) 消費セメントのうちモルタルへの利用割合(MR)がわかる場合(ただし10% < MR < 30%)：

$$\text{CO}_{2,\text{uptake,use}} = 0.20 + 0.015(\text{MR} - 10) \quad [9]$$

② 解体・再利用段階のCO₂吸収量

- i) リサイクルプラントに持ち込まれた解体コンクリート量(M_{dem})がわかる場合：

$$\text{CO}_{2,\text{uptake,dem}} = 10 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3 \times \text{M}_{\text{dem}} \quad [10]$$

- ii) リサイクルされたコンクリート量(M_{re})がわかる場合：

$$\text{CO}_{2,\text{uptake,re}} = 10 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3 \times \text{M}_{\text{re}} \quad [11]$$

- iii) 解体およびリサイクルコンクリート量がわからない場合：

$$\text{CO}_{2,\text{uptake,dem+re}} = (0.02 + 0.01) \times \text{CO}_{2,\text{emi,cal}} \quad [12]$$

国内では、黒田・菊池が初めて解体コンクリートのCO₂吸収量に関する実験的研究を行った²⁴⁾。その後、国土技術政策総合研究所により、解体コンクリート塊の再資源化施設の全国的な調査が実施され、保管状況やCO₂吸収量の実態などが明らかとなった²⁵⁾。平成22年には、土木学会に、第2種委員会「CO₂削減を考慮したコンクリート構造物の解体、再利用、補修技術に関する調査研究小委員会(219委員会)」が設置され、コンクリートライブラリー No. 134²⁶⁾にこれらの成果が盛り込まれた。この中で、CO₂吸収量には、解体コンクリートの保管期間、粒度および適度な水分供給の重要性が示された。また、**Fig. 2**に示すような解体コンクリートのCO₂吸収量の算定方法が提案された。

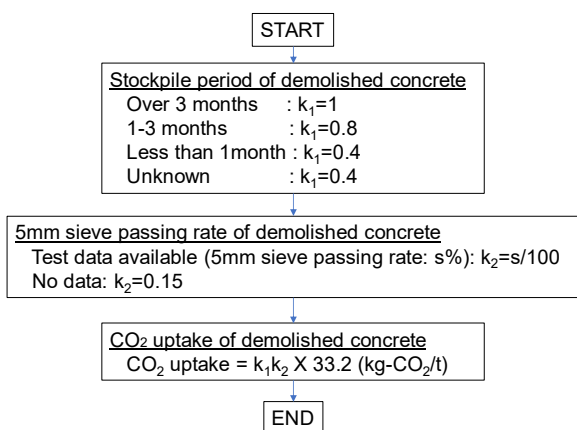


Fig. 2 Flowchart for estimating CO₂ uptake of demolished concrete
(解体コンクリートのCO₂吸収量算定フローチャート)

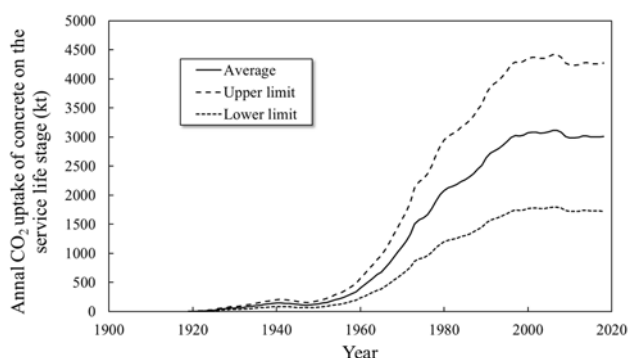


Fig. 3 Annual CO₂ uptake in concrete at the service life stage
(1年あたりのコンクリートの供用期間中のCO₂吸収量)

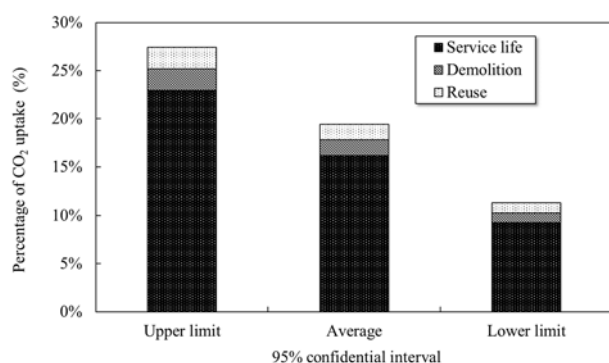


Fig. 4 Percentage of CO₂ uptake in concrete at service life, demolition and reuse stage in 2018
(2018年における供用・解体・再利用段階のCO₂吸収率)

(3) 当社における取組み

海外では、コンクリートのCO₂吸収量評価が精力的に進められているが、算定のモデルや条件は国によって異なり、CO₂吸収率は10から50%の範囲にわたっている。国内では解体コンクリートのCO₂吸収に関するデータが整理されているものの、供用期間におけるCO₂吸収量との統合がなされていなかった。そこで、当社は、海外の算定モデルを参考にしつつ、これまで国内で蓄積されたセメントコンクリートの中性化に関する知見や、解体コンクリートの国内事情を踏まえたCO₂吸収量評価モデルの構築を進めた。これは、セメントが、製造過程で排出するCO₂だけでなく、コンクリートとして使用される段階においてどの程度のCO₂を吸収するか明らかにすることにより、地球環境への影響を評価しようとするものである。

Fig. 3に、構築したモデルを用いて1年あたりの供用中のコンクリートのCO₂吸収量を時系列で示した結果の一例を示す²⁷⁾。ここでは、算定対象とする地理的範囲は日本国内とし、1919～2018年の期間に国内で消費されたセメントがすべてコンクリートとして利用され、ストックされていると仮定している。CO₂吸収量の算定基本式を式[13]に、供用段階の算定式を式[14]～[16]に、解体・再利用段階の算定式を式[17]および[18]に示す。中性化速度係数には、日本建築学会、土木学会で示される式を、炭酸化度についてはTable 5に示したEN規格(EN 16757 Annex BB)の値を用いた。その結果、2018年における供用段階のコンクリートのCO₂吸収量は、95%信頼限界で170～420万t-CO₂(平均300万t-CO₂)であった。Fig. 4に、2018年における供用、解体・再利用段階のCO₂吸収率の95%信頼限界を示す。各段階の合計のCO₂吸収量は210～510万t-CO₂となり、CO₂吸収率は10～25%(平均18%)となった²⁷⁾。

・ライフサイクル

$$M_{LC} = M_{SL} + M_{DEM} + M_{RE} \quad [13]$$

ここに、

M_{LC} : ライフサイクルを通じたコンクリートのCO₂吸収量

M_{SL} : 供用段階のコンクリートのCO₂吸収量

M_{DEM} : 解体段階のコンクリート塊のCO₂吸収量

M_{RE} : 再利用段階のCO₂吸収量

① 供用段階

$$M_{SL} = V_{SL} \times m_{SL} \quad [14]$$

$$V_{SL} = A \times d / 1000 \quad [15]$$

$$V_{SL,t} = \sum_{i=1}^t A_i \cdot d_i / 1000 - \sum_{i=1}^{t-1} A_{i-1} \cdot d_{i-1} / 1000 \quad [16]$$

ここに、

M_{SL} : 供用中に吸収したCO₂量(t-CO₂)

V_{SL} : 中性化したコンクリートの体積(m³)

m_{SL} : コンクリート 1 m³あたりのCO₂吸収量(t-CO₂/m³)

A : 供用中のコンクリートの表面積(m²)

d : 中性化深さの推定値(mm)

② 解体・再利用段階

$$M_{DEM} = m_{DEM} \times k_1 \times k_2 \times 33.2 \quad [17]$$

$$k_1 = 0.57 t^{0.5} / 1000 \quad [18]$$

ここに、

m_{DEM} : 解体されたコンクリート塊量(t)

k_1 : 保管期間によるCO₂吸収に関する係数
(t-CO₂/t)

k_2 : 5 mmふるい通過率

t : 中間処理施設における保管期間(月)

また、当社は、2019年3月に「セメント及びセメント関連製品のバリューチェーンを通じた温室効果ガス削減貢献量算定・報告プロトコル」²⁸⁾を公開した。これは、当社のセメントバリューチェーンを通じたCO₂排出削減効果を定量的に評価することを目的としたものであり、その算定方法論を示したものである。その一つとして、セメント製品の使用、解体・再利用段階におけるCO₂吸収量の算定方法の枠組みを公開しており、第三者機関からのレビューを受けたものとなっている。今後は、算定方法の高度化を図るとともに、環境評価への実装に向けて取組みを継続していく予定である。

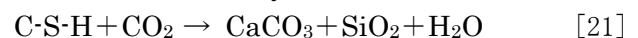
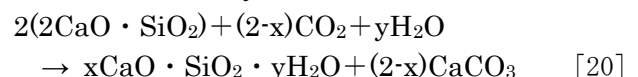
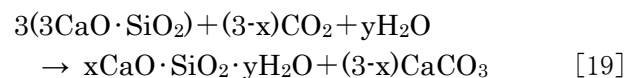
3.3 炭酸化養生によるCO₂固定

(1) コンクリートの炭酸化養生

1970年代から、蒸気養生の代替として硬化過程のコンクリートを炭酸化養生することにより、強度発現の促進や耐久性を向上させる技術がプレキャストコンクリート製品を対象に検討された。実際には、養生のためのCO₂が高コストであったことや鋼材腐食への悪影響が懸念されたため、広く普及することはなかったが、昨今のCO₂排出削減が強く求められる社会背景を受けて、コンクリートの炭酸化技術に関する研究が改めて活発化してきている。ここでは、炭酸化養生の基本的なプロセス、炭酸化養生後のコンクリートの物性、近年開発された炭酸化養生によるCO₂固定化技術について記す。なお、本節は、W. Ashraf²⁹⁾およびD. Zhangら³⁰⁾の研究を参考にした。

(2) 炭酸化反応

Table 6は、CaO-SiO₂-Al₂O₃系鉱物とCO₂との液相における反応性に関する研究結果を整理したものである。C₃SおよびC₂Sは適切な水分がある条件において、式[19]および[20]によって反応することが知られている。さらに炭酸化が進むことにより、式[21]のようにC-S-Hが脱灰し、炭酸カルシウムとシリカゲルに変化する。炭酸化養生の条件によるものの、最終的にはC₂S、C₃S、C-S-H、CaCO₃、Ca(OH)₂が混在することになる。



C₂Sの形態は5つあるが、 γ -C₂Sだけが非水硬性である。いずれのC₂SもCO₂との反応性を有し、強度発現に寄与する。また、C₃S、C₂S以外のCaO-SiO₂

Table 6 Studies on the CO₂ reactivity of cement-based materials in aqueous solution
(セメント系鉱物の液相におけるCO₂との反応性に関する研究)

Reactivity	Cement-based material
Reactive to CO ₂	Lime, C ₃ S, C ₂ S, C ₃ S ₂ , CS
Minimal reactivity or inert to CO ₂	C ₃ A, SiO ₂ , Al ₂ O ₃
Not found in published studies	CA, CA ₆ , C ₂ AS, CAS ₂ , A ₃ S ₂

系の鉱物はいずれも反応性を有する。一方、ほとんどのCaO-Al₂O₃系鉱物は、CO₂に対して最小限の反応性しか持たないあるいは不活性である。

炭酸化後の炭酸カルシウムの形態は、C₃S、β-C₂Sの場合、ほとんどが1 μm以下のカルサイトを生成するとされる。アラゴナイトは限られた条件下で生成することが報告されているが、バテライトはほとんど生成しない。一方、非水硬性のビーライトであるγ-C₂Sは、カルサイトとバテライトの両方を生成するとされる。

(3) 炭酸化養生プロセス

コンクリートの炭酸化は、相対湿度、温度、CO₂濃度、コンクリートの配合等の影響を受ける。硬化過程にあるコンクリートを効率的かつ効果的に炭酸化するためには、硬化段階に応じて養生条件を最適化することが求められる。そのため、炭酸化養生は、Fig. 5に示す3段階のプロセスで行われる。

① フェーズⅠ：前養生(Pre-Curing)

効率よく炭酸化を進めるためには、コンクリート中の細孔内の含水率を適当な範囲にする必要がある。そのため、コンクリートを成型して炭酸化養生を行うまでの期間、乾燥条件下で前養生を行う。前養生期間の環境条件は、温度20～25℃、相対湿度40～60%程度に制御され、コンクリート内部の水を除去する。CO₂吸収量は、コンクリート中の含水率を70%程度まで除去することにより急激に増加するが、それ以上含水率を下げると大幅な増加は期待できないとされている。

② フェーズⅡ：炭酸化養生(CO₂ exposure)

炭酸化養生は、コンクリート成型後、24時間以内に行われることが多い。密閉槽を用いる場合と、流動槽を用いる場合がある。流動槽は、小さいエネルギーでの養生が可能であるが、密閉槽を用いるほうがCO₂分圧を制御できるため一般に炭酸化の効率は高いとされる。

初期段階での炭酸化反応は、CO₂の拡散が支配的となるため、CO₂濃度が重要な影響因子となる。また、圧力は液相へのCO₂溶解度を上昇させる。CO₂濃度は99%以上、圧力は1～5 atm.程度で養生されていることが多い。温度は、20～25℃の常温であることが多い。高温の場合、CO₂の拡散が促進されるものの、CO₂の水への溶解度が低下するため、両者のバランスが重要とされる。また、高温養生する場合、液状水の乾燥につながることや、炭酸化反応は発熱反応であるため、コンクリート内部はさらに高温になることに留意が必要とされる。

相対湿度は、60%程度であることが多いが、高温養生する場合は、乾燥によりコンクリート内部の含水率の低下を防ぐため、90%程度にすることもある。

③ フェーズⅢ：後養生(Post-curing)

炭酸化養生後の養生は、未水和セメントの反応を促進するために行われ、所定の材齢まで水分供給が求められる。

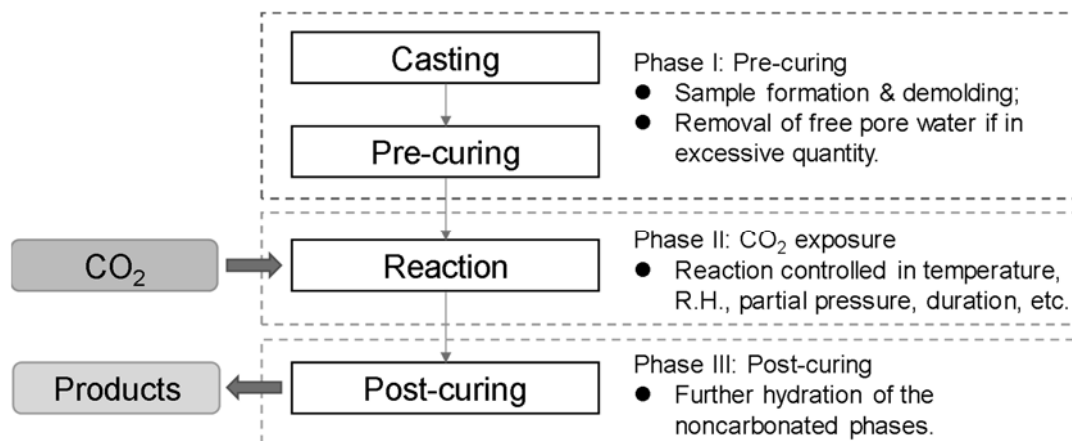


Fig. 5 Typical procedure of carbonation curing adopted in laboratory scale (試験室レベルでの炭酸化養生の手順)

(4) 炭酸化養生コンクリートの物性

① 強度特性

炭酸化養生することによってコンクリートの若材齢における強度発現性が促進される。1日強度は、標準養生したコンクリートに比べて、20%から最大2倍程度大きくなるとされる。これら若材齢における強度の促進は、炭酸イオンが十分に存在する細孔溶液によって、セメントの急速な溶解と反応を促すことに起因するとされる。ただし、コンクリートのCO₂吸収量と強度発現性は、必ずしも一致するわけではなく、配合(セメント骨材比, w/sなど)や養生条件(圧力, 温度など)の影響を受けるとされる。また、炭酸化養生したコンクリートの終局強度は、水の供給が十分であれば、炭酸化していないコンクリートとほぼ一致する。

フライアッシュや石灰石微粉末などの混合材は、それ自体は炭酸化に関して不活性であり、強度発現への影響はほとんどない。ただし、硬化体中へのCO₂の拡散を容易にすることにより、セメントの炭酸化を促進する効果が認められている。このことは、混合セメントを用いた硬化コンクリートの中性化の進行が、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも大きいことと同じ現象である。ただし、炭酸化養生によって水酸化カルシウムが減少すると、フライアッシュ等を用いた場合、ポゾラン反応が抑制され、長期強度の増進が小さくなる傾向が認められている。

炭酸化養生による強度発現性は、主にCO₂の拡散に依存するところが大きい。すなわち、コンクリートの水セメント比が大きいあるいはポーラスコンクリートのように表面積が大きい配合や、小さく薄い部材であるほど炭酸化による促進養生は有利に作用する。逆に、高強度コンクリートや部材が大きく厚いもの場合は、蒸気による促進養生のほうが有利となる。

② 耐久性

炭酸化は酸性化プロセスであり、細孔溶液のpHは低下する。pHの低下は、鉄筋コンクリート中の鋼材の不働態被膜を消失させ、鋼材腐食を促進することが良く知られている。また、pHの低下によってコンクリートの塩化物イオンの固定化量は低下することから、塩化物イオンが浸透しやすい方向に作用する。ただし、後養生によって、未水和セメントが反応することにより、水酸化カルシウムが生成しpHは一定程度回復する。また、炭酸化養生によるpH低下は主に部材表面で生じるため、内部のコンクリートのpHは維持される。そのため、鉄筋腐食に対する抵抗性は通常の養生を行った場合と変わらないとする報告もあるが、これについては今後、研究の蓄積が必要と考えられる。

炭酸化養生することにより、細孔構造が緻密化するため、一般にコンクリートの耐久性は向上する。Table 7に、炭酸化養生した場合と蒸気養生した場

Table 7 Comparison of carbonation curing and steam curing on concrete performance
(炭酸化養生および蒸気養生によるコンクリートの性能比較)

Properties	Experimental condition	Carbonation curing	Steam curing
Permeability	Rapid chloride ion penetration test	Decrease	Increase
	Air permeability test	Decrease	Increase
	Electrical resistivity	Decrease	Increase
Resistance to environment	Freezing and thawing scaling	Increase	Decrease
	Freezing and thawing degradation	Increase	Decrease
	Sulfate attack	Increase	Decrease
	Acid attack	Increase	Decrease
	Alkali silica reaction	Increase	-

合のコンクリートの耐久性についてまとめる。炭酸化養生した場合、物質移動抵抗性が大きくなり、塩化物イオンやそのほかの劣化因子の侵入抵抗性が向上する。硬化体の緻密化が、水の浸透や氷の生成を制限することにより、凍結融解抵抗性は向上する。コンクリート中の水酸化カルシウム量が炭酸化によって減少することにより、外部硫酸塩劣化や耐酸性が向上する。また、pHの低下と緻密な硬化体組織により、水やアルカリ金属イオン(Na^+ , K^+)の移動は制限されるため、アルカリ骨材反応に対する抵抗性も向上する。このように、耐久性の面からは、蒸気養生よりも炭酸化養生したコンクリートのほうが有利な場合が多いことがわかる。

(5) CO_2 固定化材料

近年、コンクリートの硬化促進等だけでなく、 CO_2 を固定化し利用することをコンセプトとした材料や技術が研究開発されている。

① 非・低水硬性セメント

非水硬性あるいは低水硬性の鉱物($\gamma\text{-C}_2\text{S}$, その他 C_2S , C_3S_2 , CS など)は、少ないエネルギーで CO_2 を活用できる材料として期待されている。Solidiaセメントは、非水硬性のウォラストナイトやランキナイトをベースとしており、炭酸化養生を前提としたセメント混合材料である³¹⁾。低い焼成温度で製造できること、セメント中のCa原単位が少ないことから、CEMI(ヨーロッパ規格の普通ポルトランドセメント)よりも CO_2 排出量が30%削減できるとしている。また、コンクリートとして炭酸化養生することにより、セメント1tあたり最大300kg- CO_2 が吸収可能であり、舗装用のブロックや鉄道の枕木等に利用された実績がある。

CO_2 -SUICOMは、副生消石灰から製造した非水硬性の $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ とフライアッシュ、ポルトランドセメントを結合材とするコンクリートであり、炭酸化養生することによりネット CO_2 排出量をニュートラルにすることが可能とされる³²⁾。道路用ブロック等のプレキャストコンクリート製品に適用された実績がある。

② コンクリート用再生骨材・微粉

解体コンクリートを再資源化する段階で、付着したセメントペースト分が CO_2 を吸収することは3.2で述べた。これを加速炭酸化することにより、コンクリート用再生骨材の性能を改善する研究が進めら

れている。再生コンクリートは、一般に普通コンクリートと比べて凍結融解抵抗性の低下や乾燥収縮の増大等の課題がある。これは、再生骨材に付着するセメントペーストに起因すると考えられている。一方、再生骨材を炭酸化することにより、付着セメントペーストは緻密化し、通常の再生コンクリートよりも強度、ヤング係数、乾燥収縮、凍結融解性等の性能が改善することが報告されている³³⁾³⁴⁾。

FastCarb³⁵⁾は、コンクリート用再生骨材をセメント工場排ガスに通すことにより、再生骨材の表面に付着したセメントペーストに CO_2 を固定化しようとするフランスの実証プロジェクトである。現状では、試験室レベルの検討段階のようである。この他、 CO_2 を固定化して骨材を製造する技術が実用化されている(Carbon8³⁶⁾, Blue Planet³⁷⁾。

解体コンクリートを、セメントペーストと骨材に高度に分離し、ペースト分を炭酸化することにより、コンクリート用混和材に利用しようとする取組みも進められている³⁸⁾。セメントペーストを炭酸化することにより生成するアルミナシリカゲルをポズラン材料として活用するものである。現状は、骨材を含まない純粋なセメントペーストの粉砕物での検討であるが、石灰石微粉末やフライアッシュを用いた場合よりも、強度発現性に優れることが報告されている³⁹⁾。

③ フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートに CO_2 を注入し固定化する技術が実用化されている(CarbonCure)⁴⁰⁾。これは、コンクリートの練混ぜ工程において CO_2 を注入し、微細な炭酸カルシウム粒子を生成させることにより固定化するものである。粒子は、セメント水和物が生成する核となり、セメントの水和反応を活性化するため、初期強度発現性が促進される。単位セメント量の1.4質量%の CO_2 固定が報告されている。

一方、フレッシュコンクリートへの CO_2 注入は、練混ぜ水を介してセメントから溶解したCaイオンと反応するものであることから、溶存しているCaイオン濃度以上の CO_2 を注入すると、セメントの水和反応を阻害し、フレッシュコンクリートの性状や強度発現性に悪影響を及ぼすことが報告されている⁴¹⁾。

4. 今後の展望

これまでは、セメント系材料の炭酸化は、硬化体中の鋼材腐食を引き起こす負の事象として捉えられることが一般的であったが、近年の気候変動に対する社会的認識の変化にともない、CO₂を吸収し安定的に固定化するという別の側面からの技術的アプローチに関心が集まっている。

コンクリートストックは膨大であり、ライフサイクルを通じたコンクリートのCO₂吸収ポテンシャルを評価することは、地球規模レベルで温室効果ガスの影響を評価するうえで重要な要素になり得る可能性がある。実際に社会実装していくうえでは、モデルの高精度化や統計値の整備が求められる一方で、セメント生産量やコンクリート量等の統計値が十分に整備されていない国や地域であってもCO₂吸収量が算定できる簡易なモデルの開発も併せて求められると考えられる。

また、建造物を解体した後のコンクリートの再資源化は、破碎等の工程を通じて大幅に表面積が大きくなるため、供用時と比べて短時間でCO₂を吸収固定できる。日本国内では、ほぼすべての解体コンクリートがリサイクルされているが、海外では、リサイクル率が低いあるいはほとんどを埋め立て処理している国もある。このことは、CO₂を吸収固定する機会が失われているとも捉えられ、資源の有効利用の観点からも、解体コンクリートのリサイクルは、今後、重要な技術方策となっていくと考えられる。コンクリート用再生骨材の加速炭酸化技術は、再生骨材表面に付着するセメントペーストの密実化にともなう再生コンクリートの高性能化とCO₂吸収固定の両立を目指した技術であり、今後の技術発展動向が注目されている。これについては、要素技術としてだけでなく、再資源化にともなうプロセス全体をLCA、LCCO₂の観点から評価していくことも必要であると考えられる。

コンクリートの炭酸化養生は、従来、蒸気養生と比較される促進養生であったが、鋼材腐食等の懸念から広く普及するには至らなかった。一方、温室効果ガスの削減が求められる昨今の社会背景から、その重要性が再認識されるとともに、炭酸化養生を前提とした材料の開発も活発化してきている。現状、炭酸化養生の対象は、硬化体中へのCO₂の拡散が必要であることから、比較的薄く小さい無筋プレキャストコンクリートに限られている。今後、用途を拡大するうえでは、部材寸法の大きいコンクリートや

鉄筋コンクリート等へ適用できる技術の開発が期待される。また、フレッシュコンクリートへのCO₂固定化技術については、コンクリート特性に及ぼす影響をさらに明らかにしていくとともに、コンクリートあたりのCO₂固定量を増加する技術が望まれる。

コンクリートの炭酸化現象に関する研究については、これまでの知識の蓄積があるものの、一層その理解を深めるとともに、現象を実務設計に落とし込む取組みが重要であると考えられる。炭酸化したセメント硬化体の組織や物性が異なる環境条件や経時にともなってどのような挙動を示すか、ミクロ・マクロの両面から明らかにすることにより、炭酸化養生したコンクリートの活用につながるものと思われる。促進条件と実環境での炭酸化進行挙動の違いを明らかにすることや、炭酸化とともに変化する硬化体の空隙構造を考慮した物質移動モデルの構築などもそれにあたる。また、コンクリートの炭酸化と鋼材腐食の関係を明らかにすることも重要な研究要素である。中性化が適度な乾燥環境で進行しやすいのに対し、鋼材腐食の進行には水分の供給が必須となる。近年、両現象の進行速度が、異なる環境条件で促進されることを合理的に設計に組み込む方法が示されつつある³⁾。現象の正しい理解が進むことにより、炭酸化養生の適用範囲の拡張につながるものが期待される。

参考文献

- 1) International Energy Agency. Energy and technology Perspective 2020.
- 2) Björn Lagerblad. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle—State of the art. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Report 2. 2005, p. 11.
- 3) 土木学会. 2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編]. 2018, p. 153-156.
- 4) 日本建築学会. 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説. 2016.
- 5) 岸谷孝一. 鉄筋コンクリートの耐久性. 鹿島建設技術研究所出版部. 1963.
- 6) 日本建築学会. コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説. 1976.
- 7) 和泉意登志. コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策：中性化. コンクリート工学. 32(2), 1994, p. 72-83.

- 8) 星野清一, 小川邦英, 後藤孝治. 石灰石微粉末を添加したモルタルの中性化速度に関する一考察. コンクリート工学論文集. 2000, 11(3), p. 111-119.
- 9) 小津 博, 山田一夫, 小早川 真, 市川牧彦. 養生期間が三成分系混合セメントモルタルの中性化速度に及ぼす影響. セメント・コンクリート論文集. 2002, 56, p. 463-470.
- 10) 郭 度 連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野 敦. 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価. 土木学会論文集. 2002, 718(V-57), p. 59-68.
- 11) Karl Krenkler. Chemie des Bauwesens, Band 1: Anorganische Chemie. Springer. 1980. (in German)
- 12) Andreas Leemann; Hunkeler Fritz. Carbonation of concrete: assessing the CO₂ uptake. Cemsuisse Projekt 201602. 2016.
- 13) Fengming Xi; Steven J. Davis; Philippe Ciais et al.. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, Nature Geoscience. 2016, 9(12), p. 880-883.
- 14) J. Gajda, F. M. Miller. Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: a Literature Review and Estimation of CO₂ Absorption by Portland Cement Concrete (PCA R&D Serial No. 2255a). Portland Cement Concrete. 2000.
- 15) S. Jacobsen; P. Jahren. Binding of CO₂ by Carbonation of Norwegian OPC Concrete. Third CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete: Supplementary Papers. 2001, p. 329-338.
- 16) Claus Pade; Maria Guimaraes. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. Cement and Concrete Research. 2007, 37(9), p. 1348-1356.
- 17) Peter V. Nygaard; Andreas Leemann. Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung (Carbon dioxide uptake of reinforced concrete structures due to carbonation). Cemsuisse Projekt 201106. 2012. (in German)
- 18) Ronny Andersson; Katja Fridh; Håkan Stripplé; Martin Häglund. Calculating CO₂ Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life. Environmental science & technology. 2013, 47(20), p. 11625-11633.
- 19) Keun-Hyeok Yang; Eun-A Seo; Sung-Ho Tae. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. Environmental Impact Assessment Review. 2014, 46, p. 43-52.
- 20) Daragh Fitzpatrick; Mark G. Richardson; Éanna Nolan. Sequestration of carbon dioxide by concrete Infrastructure: A preliminary Investigation in Ireland. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. 2015, 10(1), p. 66-77.
- 21) Edwin Vermeulen. Balans tussen emissie en opname CO₂: Hoe zit het nu werkelijk met de CO₂-emissie en-opname door beton (Balance between emission and CO₂ uptake. What about the CO₂ emission and absorption by concrete?). 2017. (in Dutch)
<https://www.betoniek.nl/balans-tussen-emissie-en-opname-co2> (accessed 2020-11-10)
- 22) Carmen Andrade; Miguel Ángel Sanjuán. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. Sustainability. 2018, 10(12), e4806.
- 23) Håkan Stripplé; Christer Ljungkrantz; Tomas Gustafsson; Ronny Andersson. CO₂ uptake in cement containing products: Background and Calculation Models for IPCC Implementation. IVL Swedish Environmental Research Institute. 2018.
- 24) 黒田泰弘, 菊地俊文. 解体コンクリートによる二酸化炭素の固定. コンクリート工学論文集. 2009, 20(1), p. 15-22.
- 25) 神田太朗, 曾根真理, 岸田弘之. コンクリートの供用および再資源化による二酸化炭素の固定に関する全国調査. コンクリート工学. 49(8), 2011, p. 9-16.
- 26) 土木学会. コンクリート建造物の補修・解体・再利用におけるCO₂削減を目指して: 補修における環境配慮および解体コンクリートのCO₂固定化(コンクリートライブラリー134). 2012.

- 27) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾 宙, 野村幸治. ライフサイクルを通じたコンクリートのCO₂吸収量算定に関する研究. セメント・コンクリート論文集. 2021.印刷中)
- 28) 太平洋セメント. セメント及びセメント関連製品のバリューチェーンを通じた温室効果ガス削減貢献量算定・報告プロトコル Ver. 1.0. 2019.
<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/other/gas/index.html>(accessed 2020-11-09)
- 29) Warda Ashraf. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. Construction and Building Materials. 2016, 120, p. 558-570.
- 30) Duo Zhang; Zaid Ghoulah; Yixin Shao. Review on carbonation curing of cement-based materials. Journal of CO₂ Utilization. 2017, 21, p. 119-131.
- 31) Vincent Meyer; Nick de Cristofaro; Jason Bryant; Sada Sahu. Solidia Cement an example of Carbon Capture and Utilization. Non-Traditional Cement and Concrete: 6th International Conference Non-Traditional Cement and Concrete 2017 (Key Engineering Materials, 761). 2018, p. 197-203.
- 32) 取違 剛, 横関康祐, 盛岡 実, 山本賢司. γ -2CaO \cdot SiO₂を混入して強制炭酸化したセメント系材料による環境負荷の低減. セメント・コンクリート論文集. 2009, 63(1), p. 161-167.
- 33) Dongxing Xuan; Baojian Zhan; Chi Sun Poon. Development of a new generation of eco-friendly concrete blocks by accelerated mineral carbonation. Journal of Cleaner Production. 2016, 133, p. 1235-1241.
- 34) Jiake Zhang; Caijun Shi; Yake Li et al.. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015, 27(11).
- 35) FastCarb. Axis 1-Experimental approach in the laboratory.
<https://fastcarb.fr/en/program/experimental-approach-in-the-laboratory>(accessed 2020-11-10)
- 36) Carbon8 Systems.
<http://c8s.co.uk>(accessed 2020-11-10)
- 37) Blue Planet.
<http://www.blueplanet-ltd.com/>(accessed 2020-11-10)
- 38) Jan Skocek; Maciej Zajac; Mohsen Ben Haha. Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. Scientific Reports. 2020, 10(1), e5614.
- 39) Maciej Zajac; Jan Skocek; Pawel Durdzinski et al.. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. Cement and Concrete Research. 2020, 134, e106090.
- 40) CarbonCure Technologies.
<https://www.carboncure.com/>(accessed 2020-11-10)
- 41) Jacek Kwasny; P.A.Muhammed Basheer; Mark I. Russell et al.. CO₂ Sequestration in Cement-Based Materials During Mixing Process Using Carbonated Water and Gaseous CO₂. Proceedings of the 4th international conference on the durability of concrete structures. 2014, p. 72-79.