

# 環境配慮型コンクリートの 技術の現状、および 利用における課題

野口貴文

東京大学・教授(大学院工学系研究科建築学専攻)

# 話題

---

- **コンクリートに関わる環境問題の現状**
  - 資源循環問題の現状
  - CO<sub>2</sub>排出問題の現状
- **地球におけるCO<sub>2</sub>・炭素の循環**
- **環境配慮型コンクリートの技術の現状**
  - サーキュラーエコノミー(資源循環)に資するコンクリート
  - カーボンニュートラル(脱炭素)に資するコンクリート
- **環境配慮型コンクリートの利用における課題**
  - 技術的課題
  - 制度的課題
  - 経済的課題
- **環境配慮型コンクリートのあるべき姿**

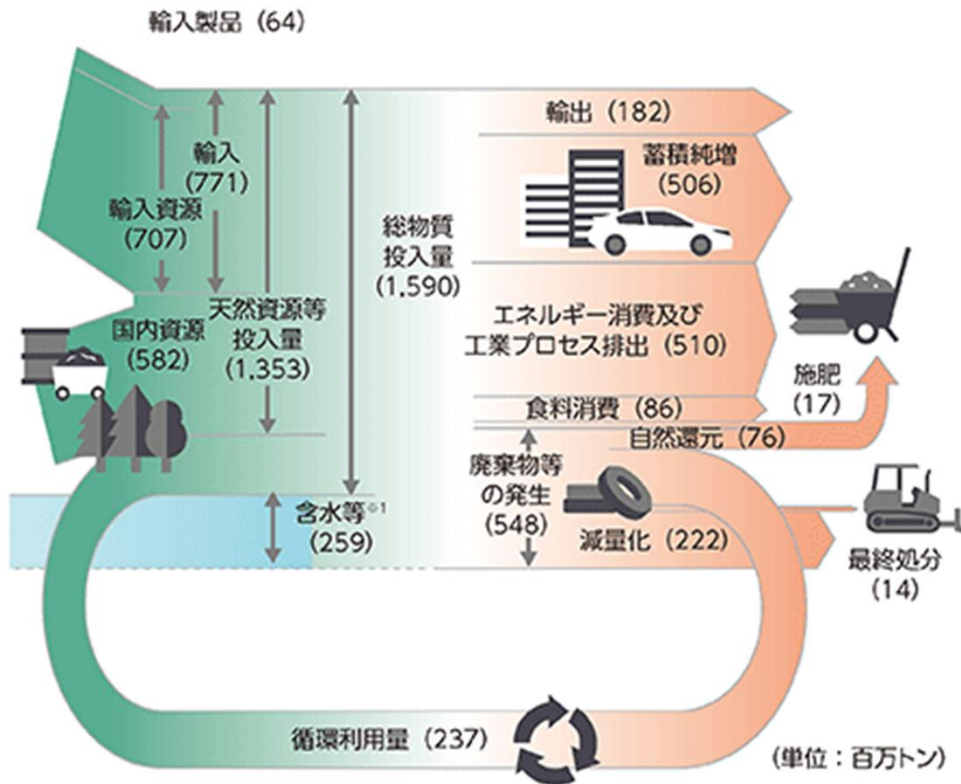
# コンクリートに 関わる環境問 題の現状

## 資源循環問題の 現状

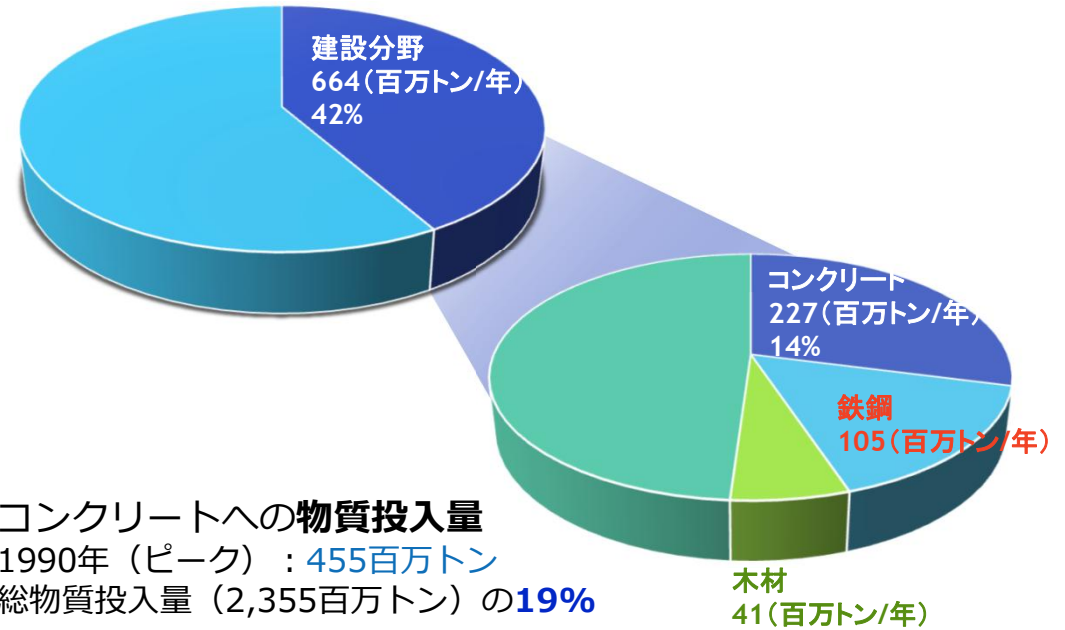


# 建設分野・コンクリート分野への資源投入の現状

日本の物質フロー（2017年度）



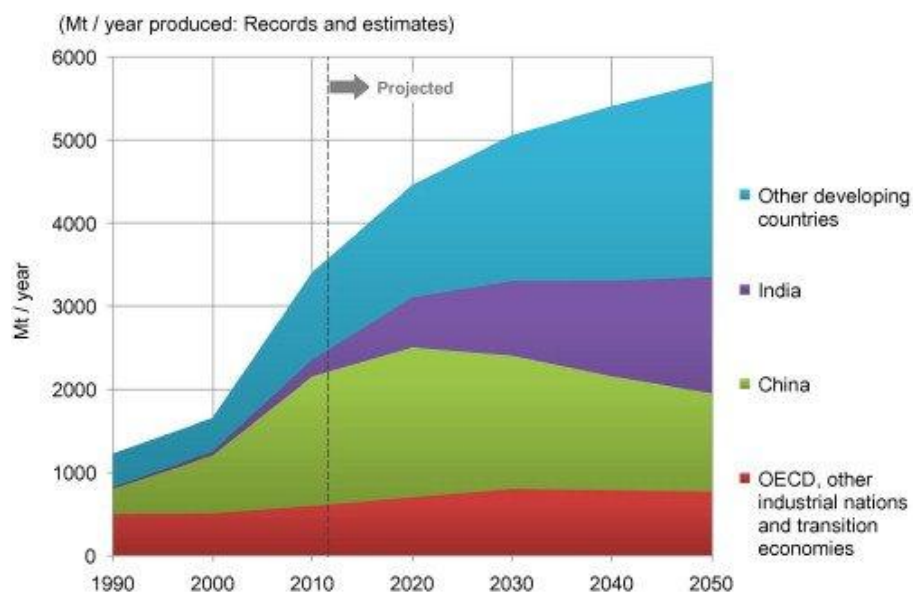
日本の総物質投入量：1,590（百万トン/年）



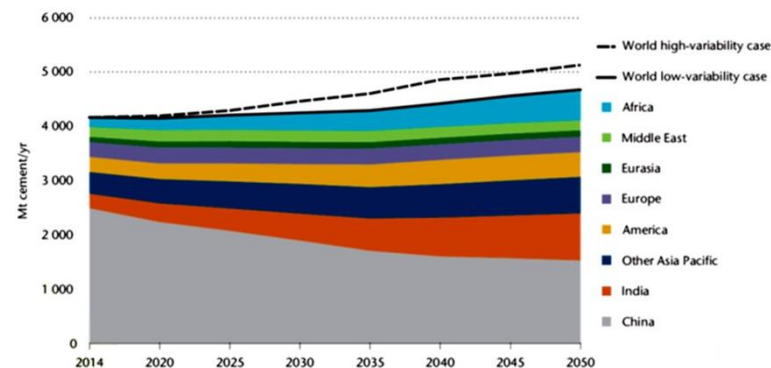
環境省「令和2年版環境・循環型社会・生物多様性白書」、産業環境管理協会「リサイクルデータブック2019」、全国生コンクリート工業組合連合会「過去の出荷実績」、日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要覧」、林野庁「平成30年度森林・林業白書」を基に作成

# セメント・コンクリート分野への資源投入の将来

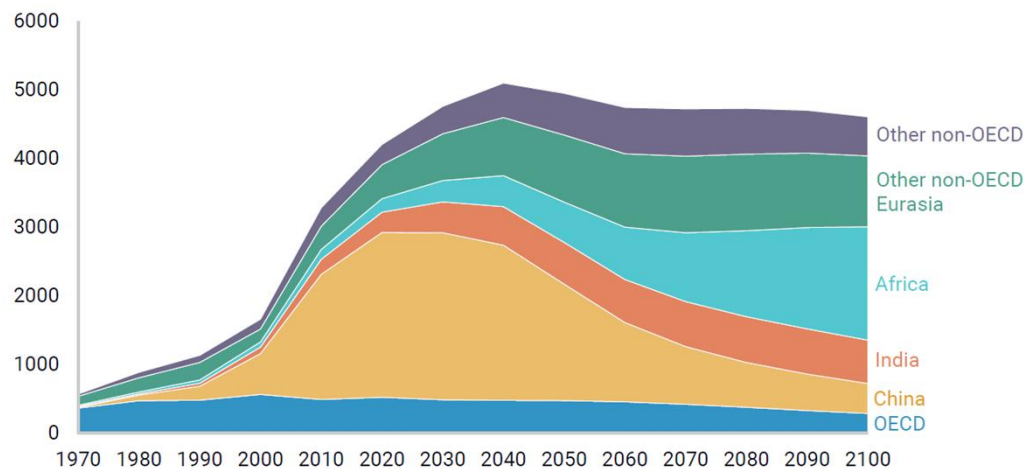
## 世界全体のセメント生産量の推移・将来予測



Mohammed S. Imbabi, Collette Carrigan and Sean McKenna: Trends and developments in green cement and concrete technology, International Journal of Sustainable Built Environment, Vol.1, No.2, pp.194-216, 2012



IEA WBCSD CSI: Technology Roadmap, Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018

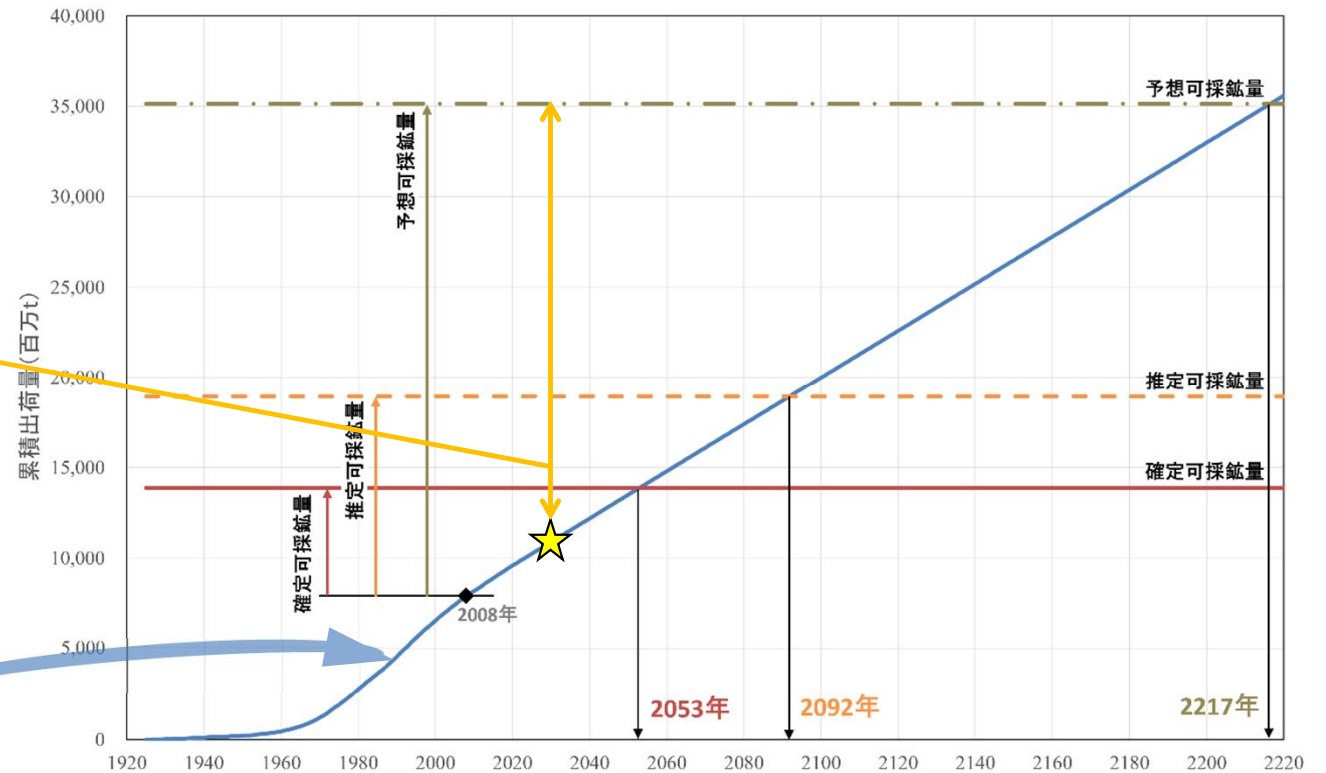
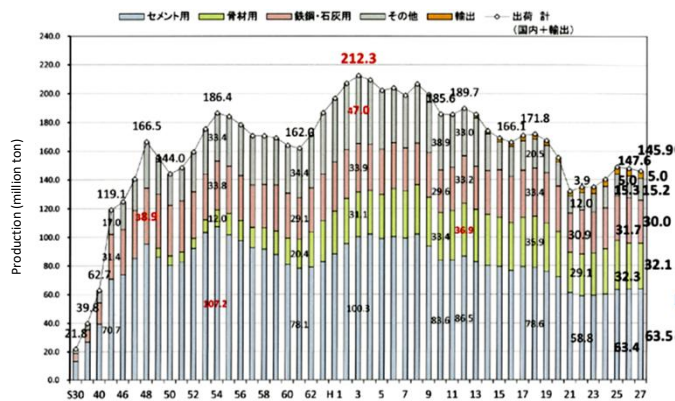


Emma Rutkowski, Hannah Pitt and Kate Larsen: The Global Cement Challenge, Rhodium Group, 2024, <https://rhg.com/research/the-global-cement-challenge/>

# 石灰石資源(セメント原料)の枯渇(日本)

石灰石の生産量(消費量)=約1.3億トン/年

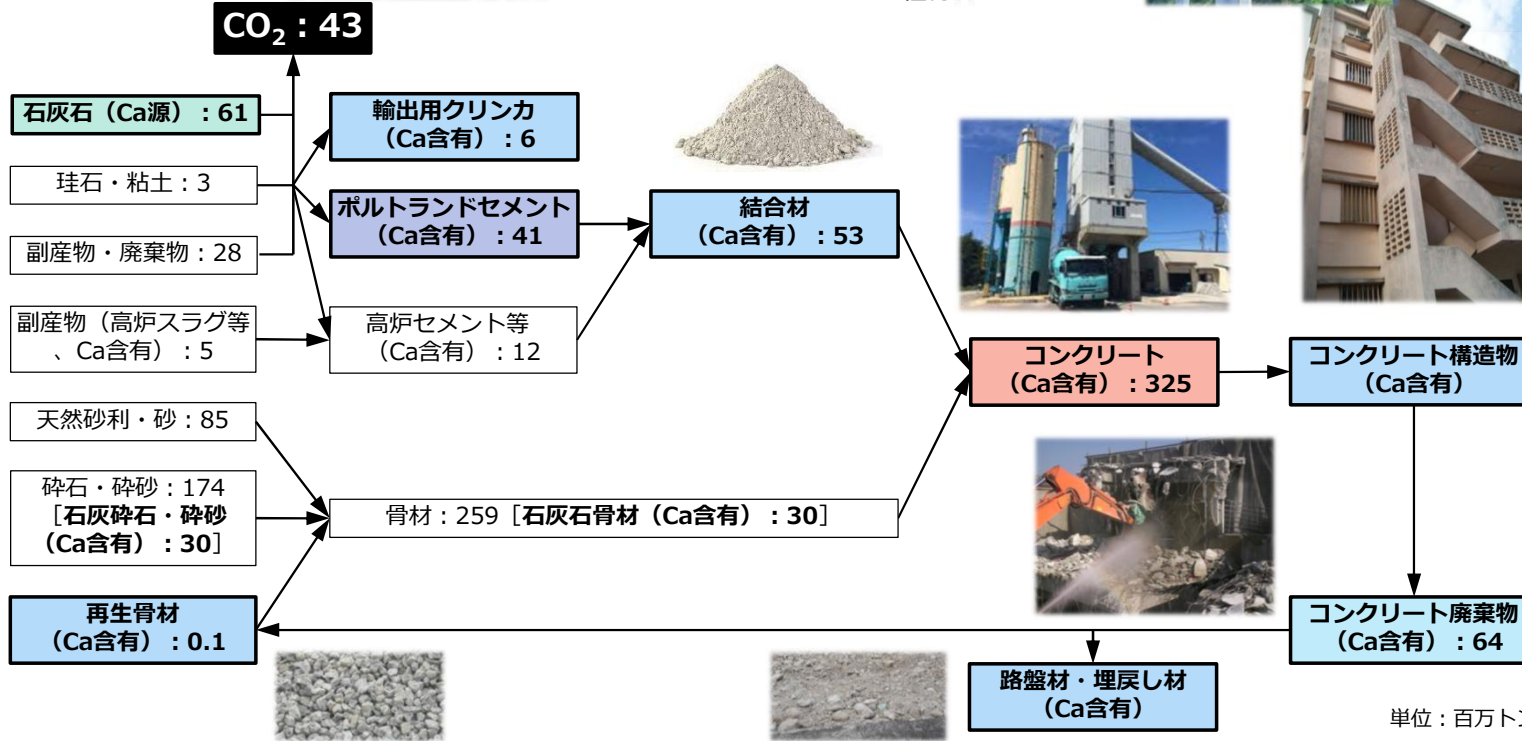
	埋蔵量 (億トン)	余命 (年)	可採量 (億トン)	余命 (年)
確定	36	27	29	17
推定	71	56	55	42
予想	237	191	143	110



# セメント・コンクリートのマテリアルフロー



前提条件（コンクリート）  
 ■気乾単位容積質量 (t/m<sup>3</sup>) 2.3  
 ■配（調）合 (kg/m<sup>3</sup>)  
 水： 180  
 セメント： 300  
 細骨材： 880  
 粗骨材： 1000



セメント協会：セメントのLCIデータの概要、2021  
 石灰石鉱業協会調査部：石灰石の生産・出荷推移、2021  
 経済産業省製造産業局素材産業課：平成29年度総合骨材需給表（試算）、2020  
 セメント協会：2016年会計年度 都道府県別需要部門別販売高、  
[https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh3\\_1600\\_d.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh3_1600_d.pdf)  
 セメント協会：生産高（会計年）、  
[https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2\\_1100.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_1100.pdf)



# コンクリートに 関わる環境問 題の現状

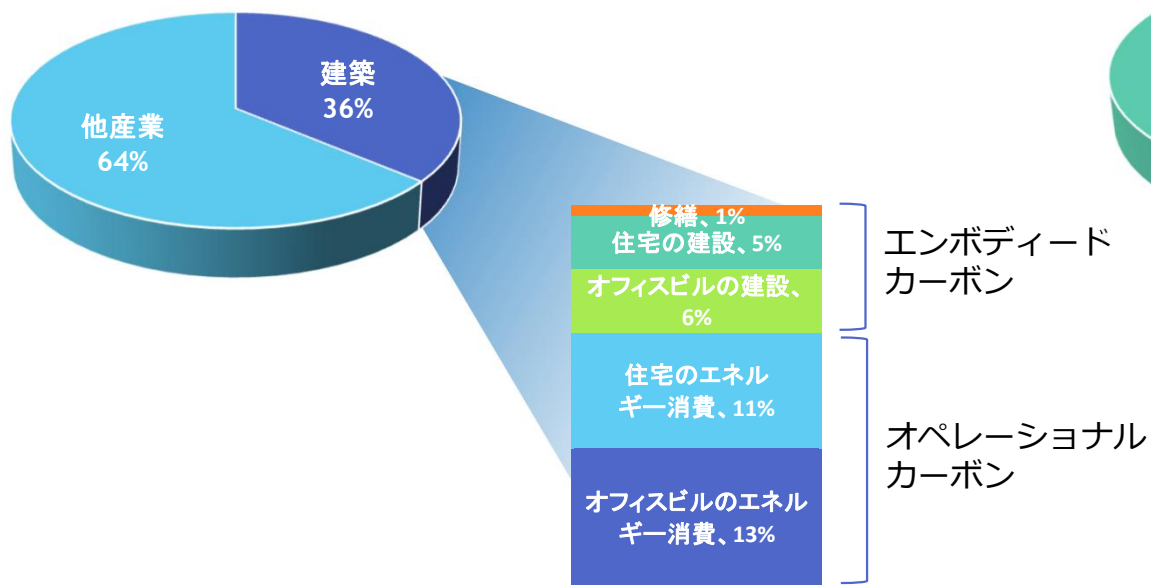
## CO<sub>2</sub>排出問題の 現状



# 建設分野におけるCO<sub>2</sub>排出量

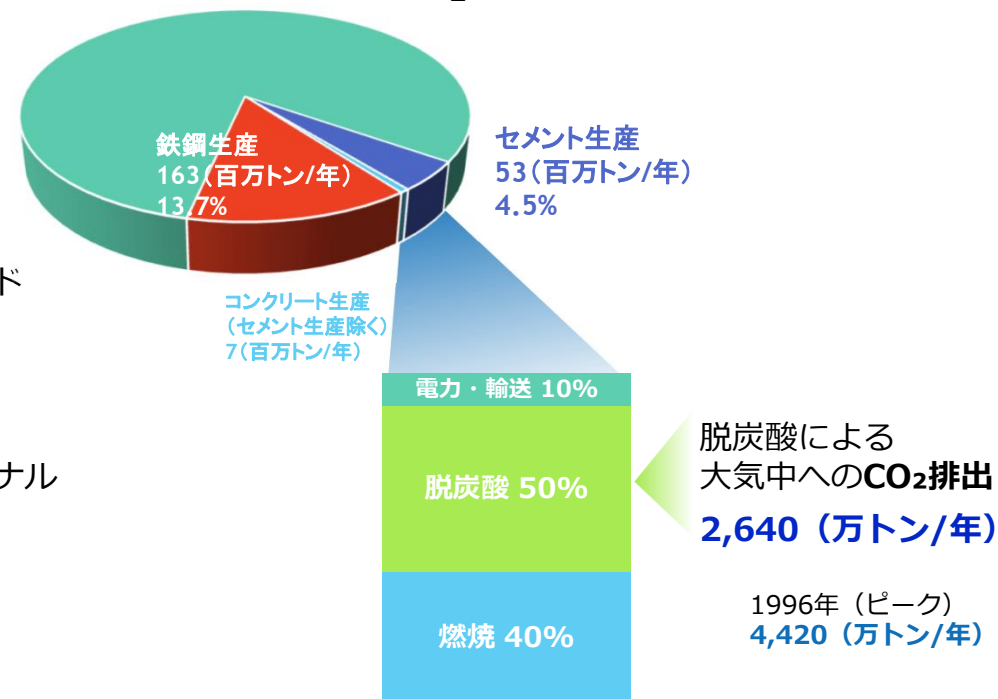
日本の総CO<sub>2</sub>排出量：1,190（百万トン/年）・・・2017年

建設分野CO<sub>2</sub>排出の現状



秋山宏、伊香賀俊治、木俣信行「地球環境問題への建築学会の取り組みと展望」、建築雑誌、Vol.114、No.1444、1999」を基に作成

建設材料生産におけるCO<sub>2</sub>排出の現状

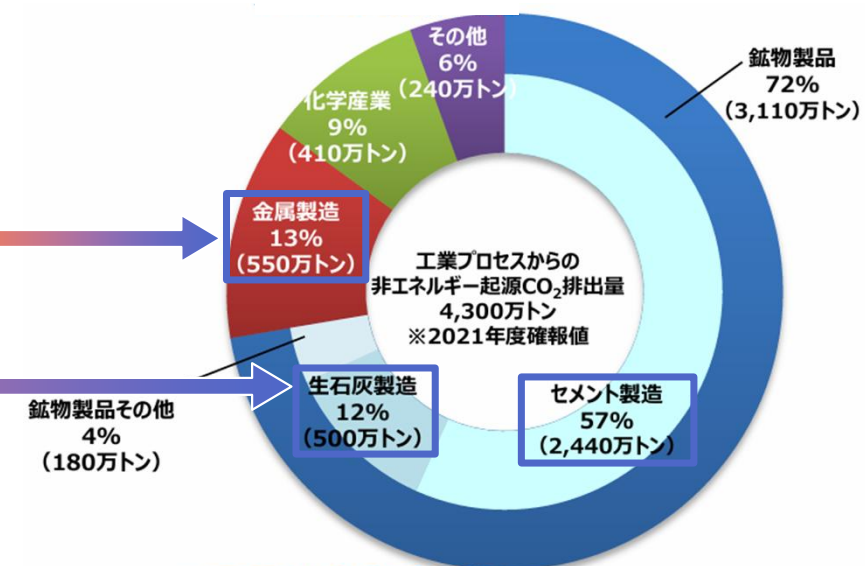
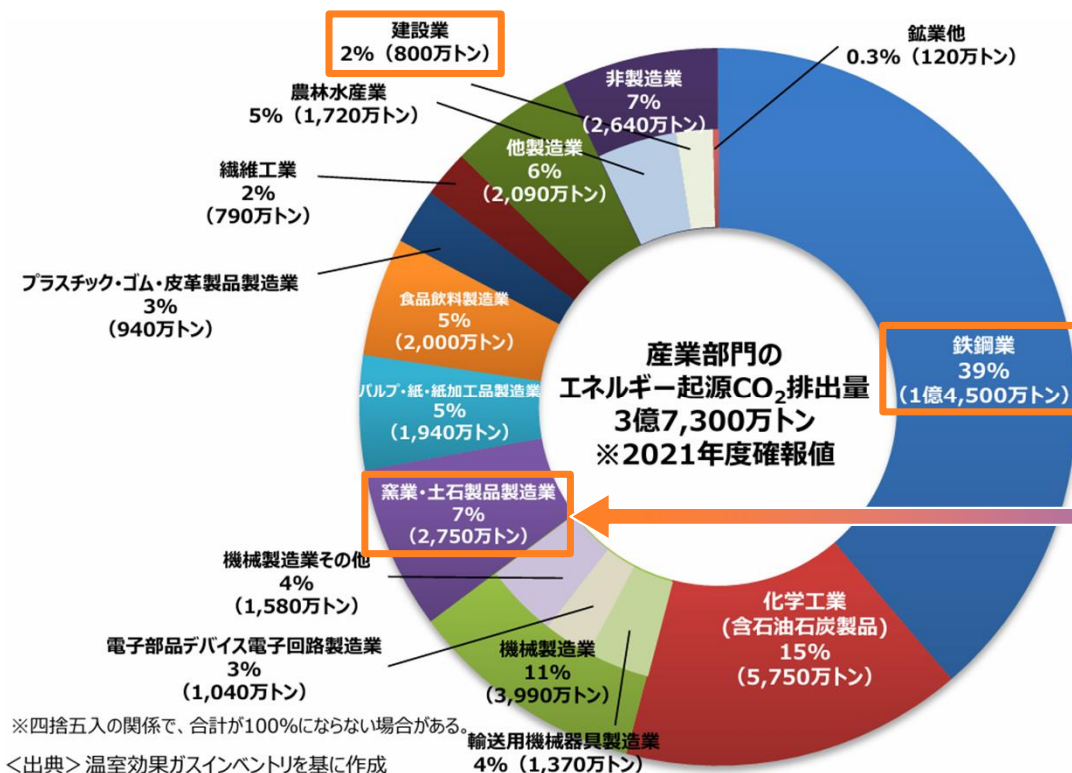


国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ」、日本コンクリート工学会「コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書」を基に作成

# 材料・製品・構造物の生産に伴うCO<sub>2</sub>排出量

産業部門からのエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量

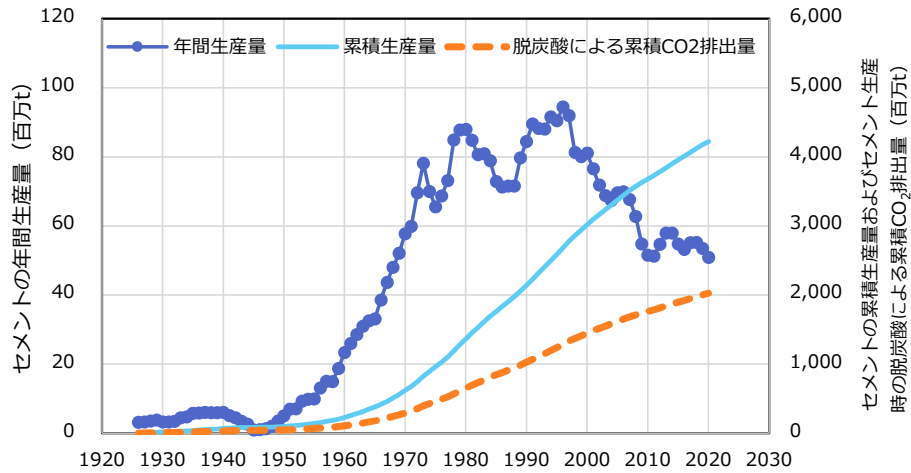
工業プロセスからの非エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量



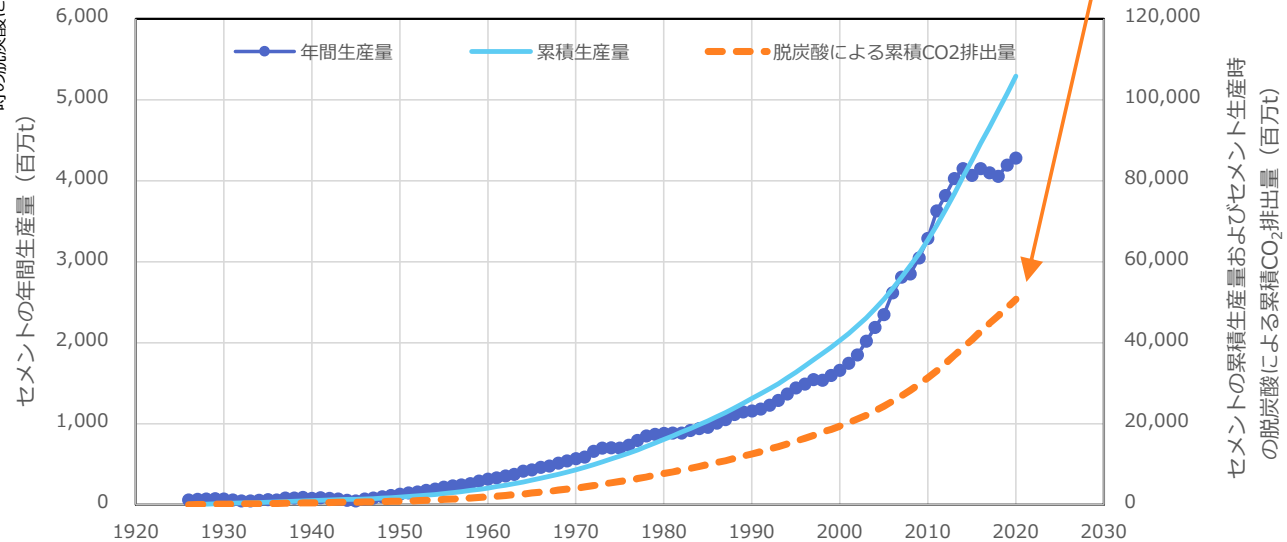
<https://www.env.go.jp/content/000150033.pdf>

# セメント生産時の脱炭酸による累積CO<sub>2</sub>排出量

## 日本

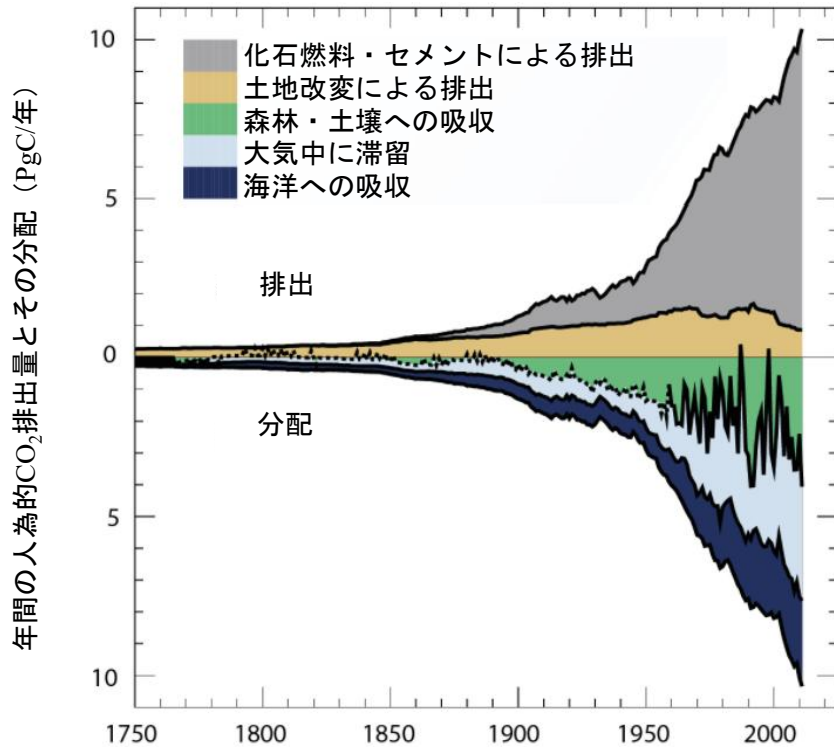


## 世界全体



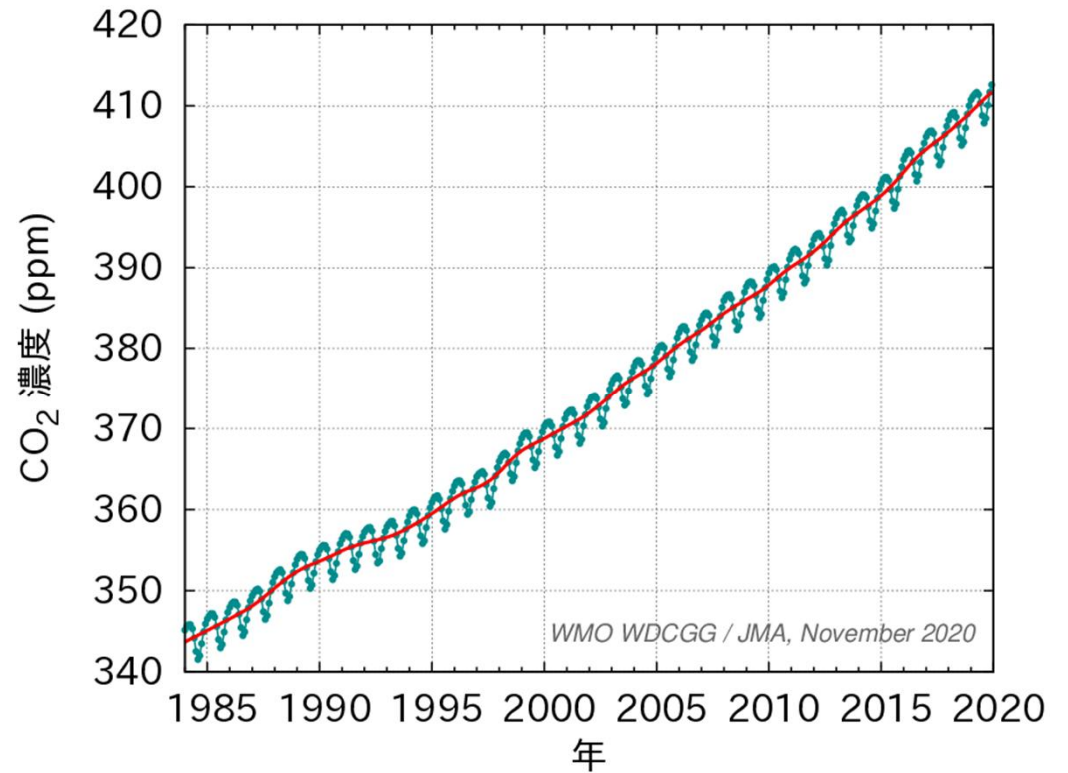
# 地球全体のCO<sub>2</sub>の排出量・吸収量・濃度

## CO<sub>2</sub>排出量・吸収量の推移



IPCC: Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 6 Carbon and Other Biogeochemical Cycles, 2013

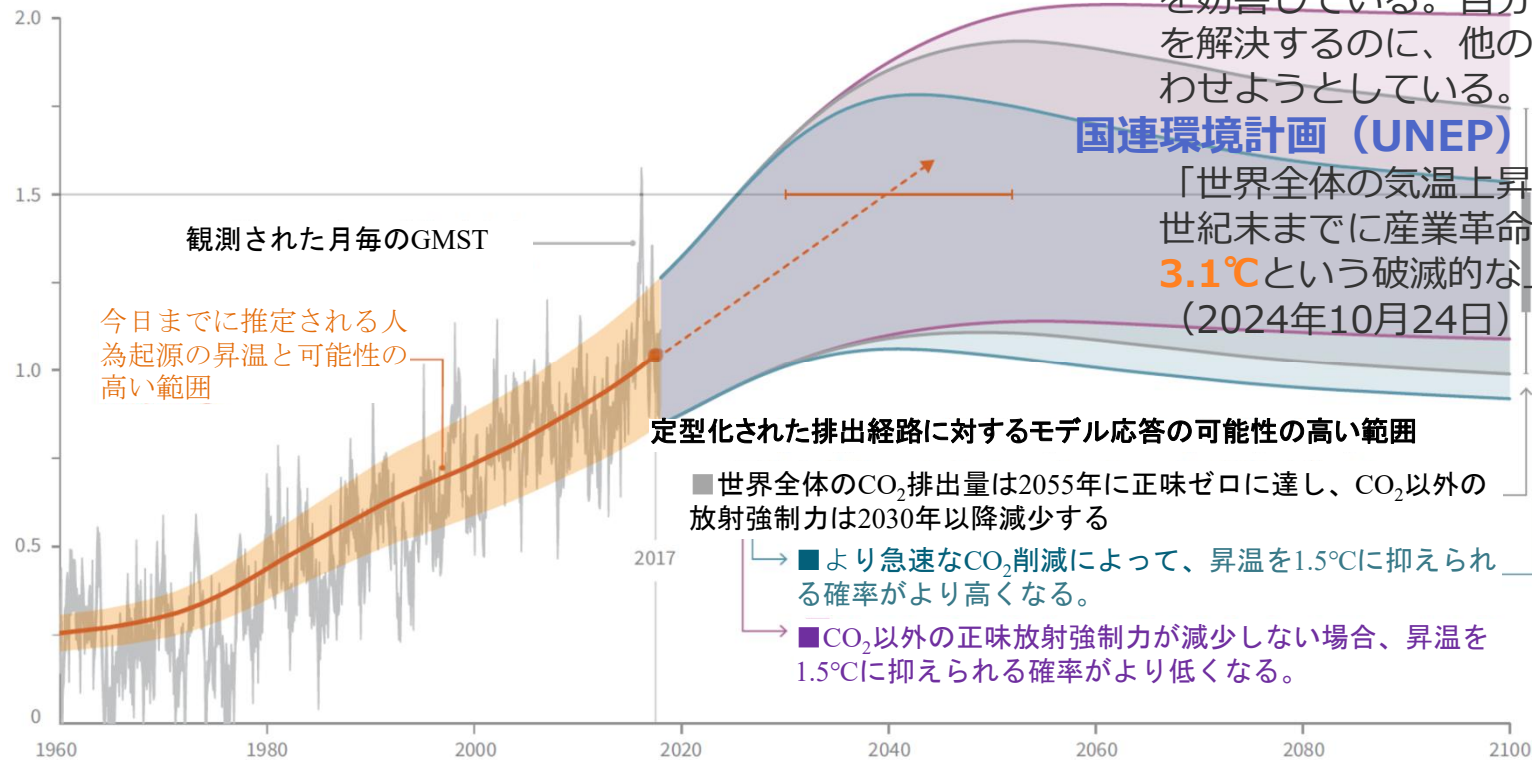
## 地球のCO<sub>2</sub>濃度の経年変化



気象庁: 二酸化炭素濃度の経年変化、地球全体の二酸化炭素の経年変化

# 地球温暖化

1850~1900年を基準とした地球温暖化 (°C)



## COP29 (アゼルバイジャン)・・・化石賞受賞

「支援額の目標案も提案せずに参加し、会議の進展を妨害している。自分たちが引き起こした気候危機を解決するのに、他のすべての国に同等の責任を負わせようとしている。」 (2024年11月15日)

## 国連環境計画 (UNEP)

「世界全体の気温上昇は間もなく1.5°Cを超え、今世紀末までに産業革命以前と比べて**2.6°Cから3.1°C**という破滅的な上昇に達する可能性がある」 (2024年10月24日)

定型化された排出経路に対するモデル応答の可能性の高い範囲

■ 世界全体のCO<sub>2</sub>排出量は2055年に正味ゼロに達し、CO<sub>2</sub>以外の放射強制力は2030年以降減少する

■ より急速なCO<sub>2</sub>削減によって、昇温を1.5°Cに抑えられる確率がより高くなる。

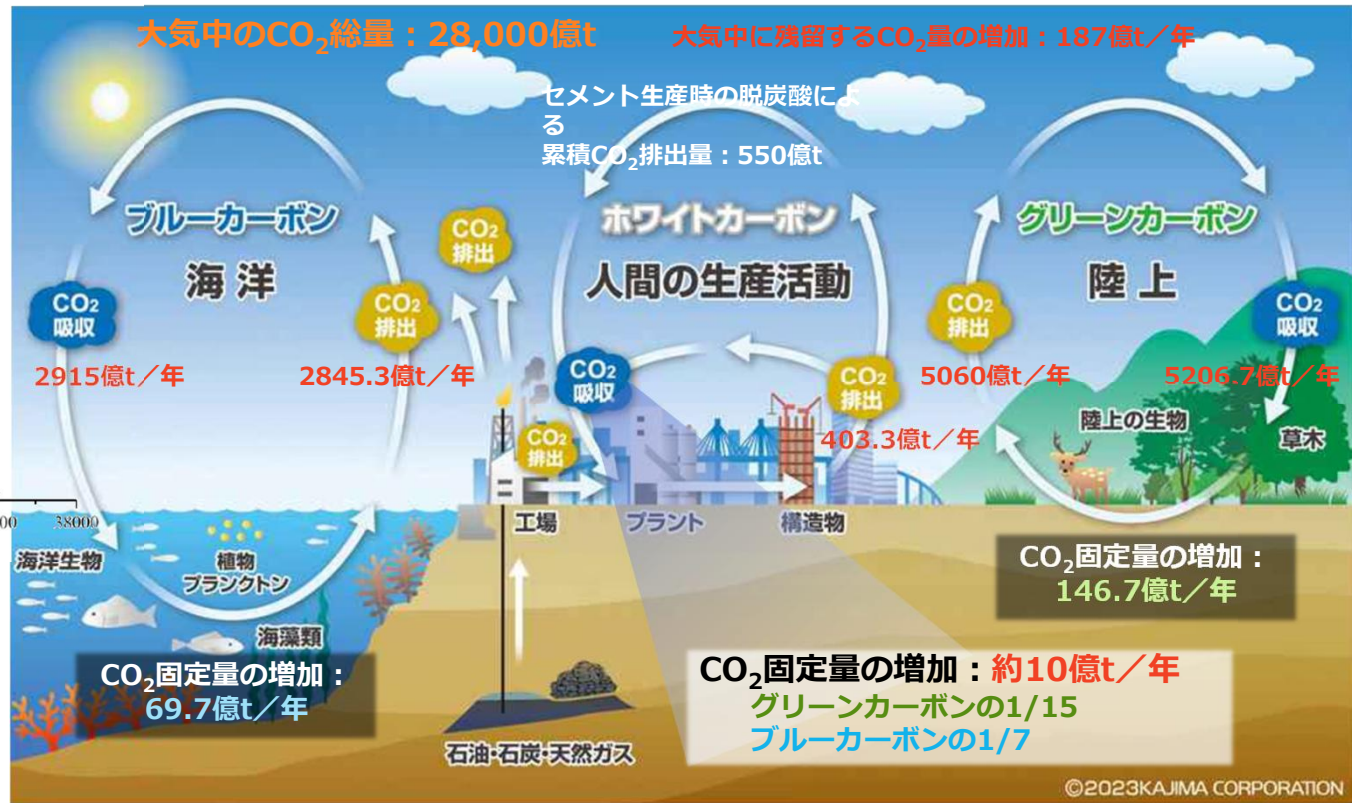
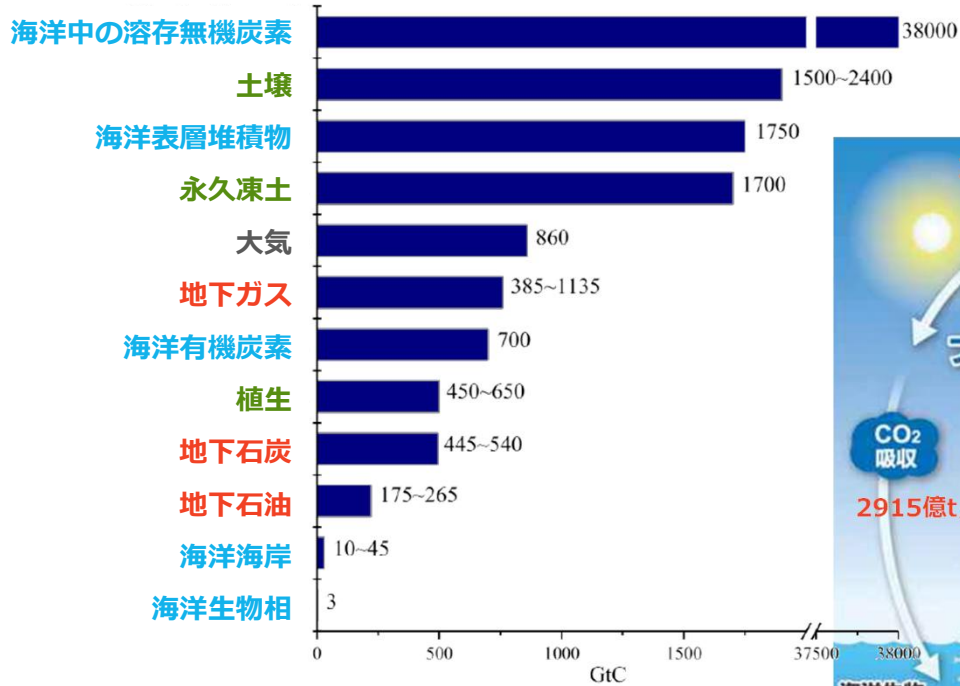
■ CO<sub>2</sub>以外の正味放射強制力が減少しない場合、昇温を1.5°Cに抑えられる確率がより低くなる。

環境省「IPCC「1.5°C特別報告書」の概要」を修正

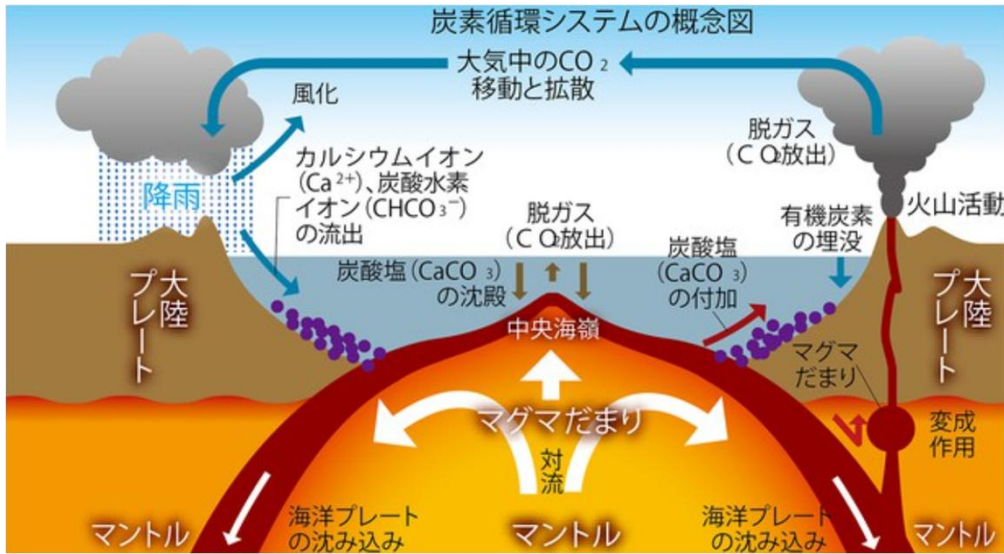
# 地球における CO<sub>2</sub>・炭素の循環



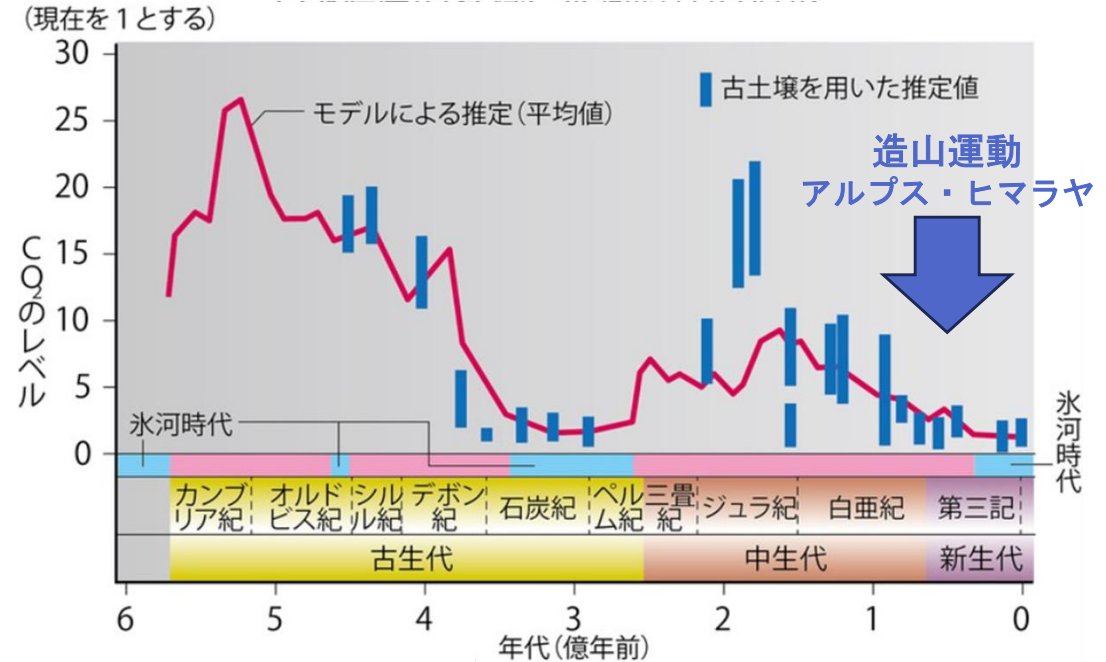
# 地球における炭素(C)の存在場所、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の循環



# 無機系炭素(C)の循環と大気中のCO<sub>2</sub>

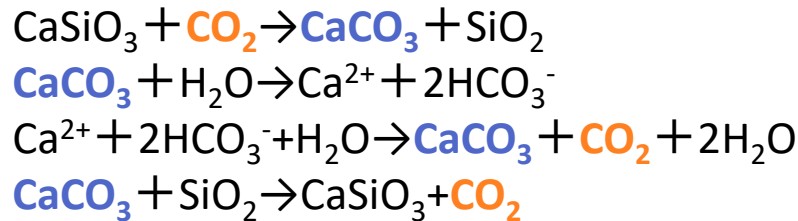


<https://weekly-economist.mainichi.jp/articles/20201215/se1/00m/020/061000c>

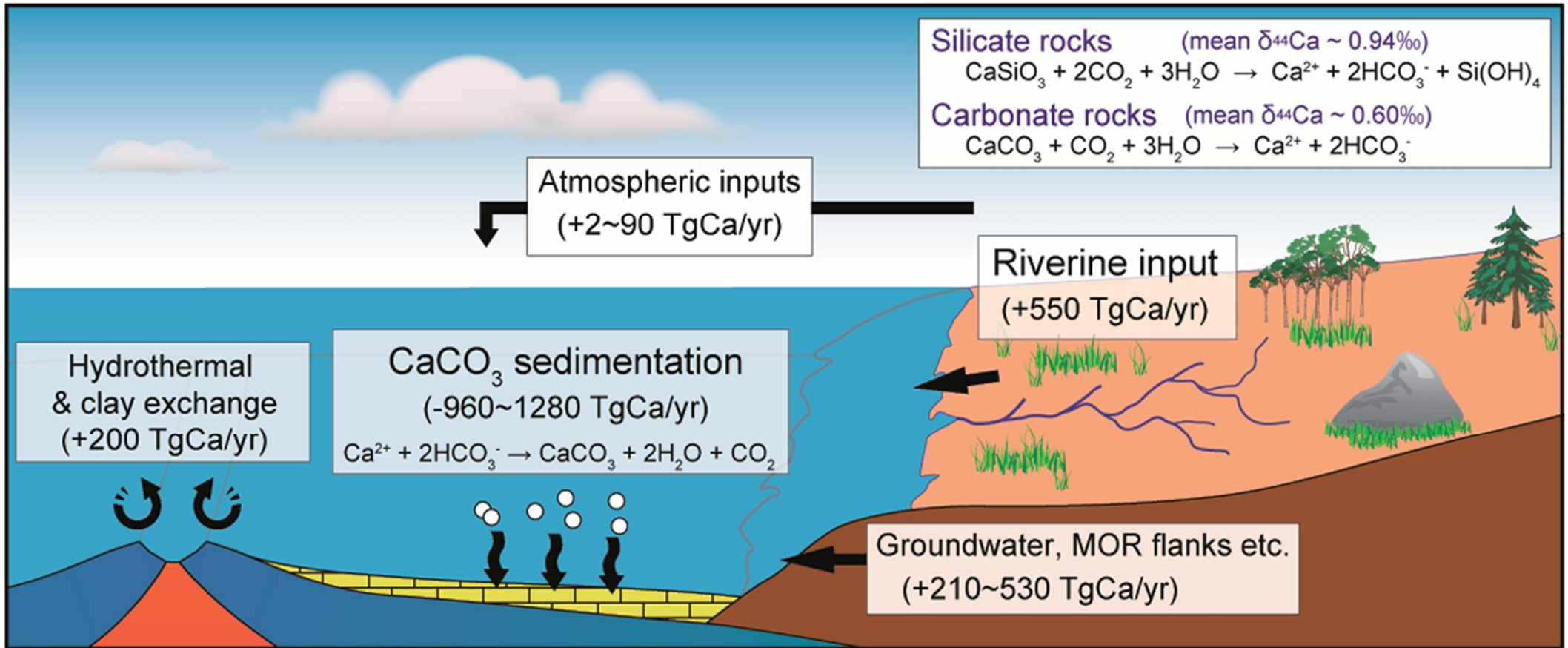


<https://weekly-economist.mainichi.jp/articles/20201222/se1/00m/020/072000c>

珪酸塩の風化  
陸上での炭酸塩の風化  
海底での炭酸塩の沈殿  
炭酸塩の変成

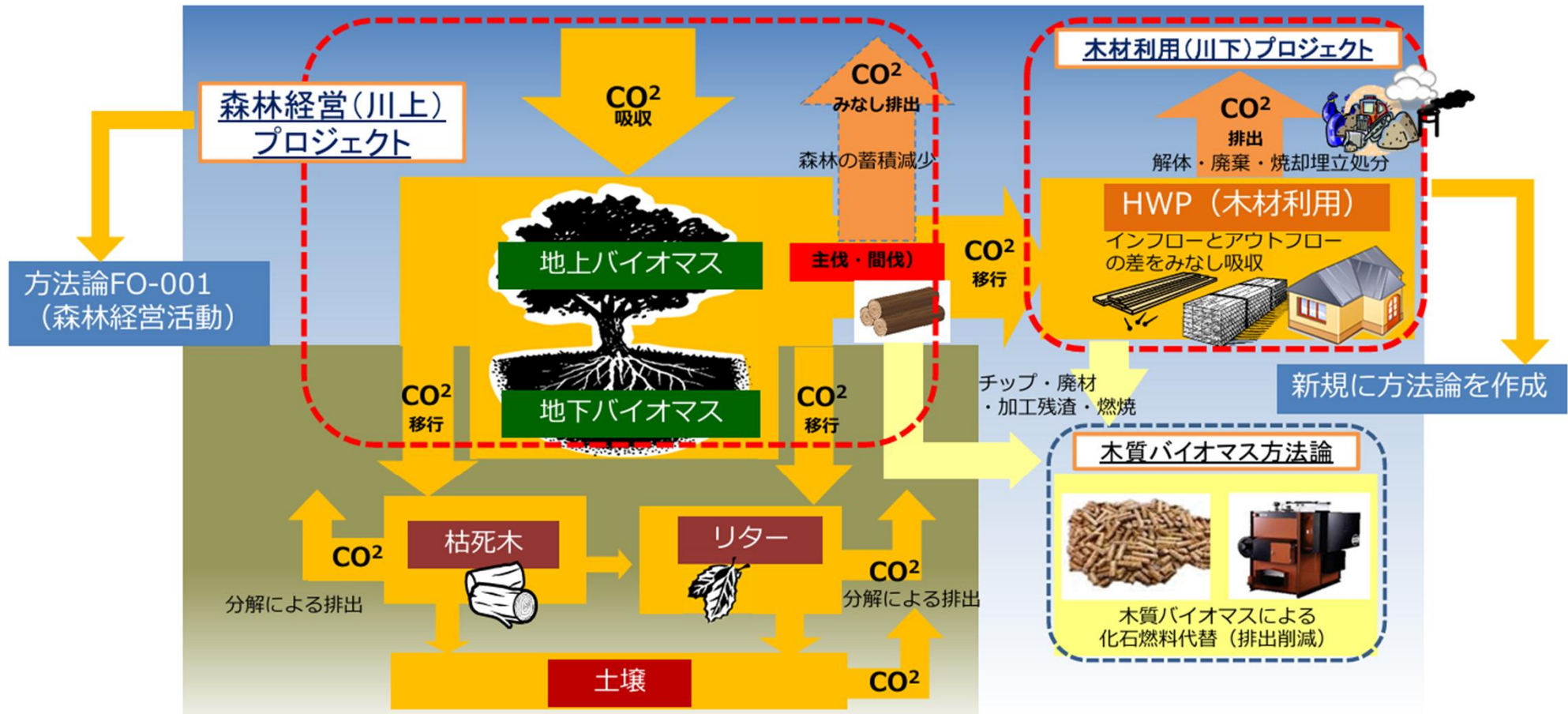


# 海洋におけるカルシウム(Ca)と炭素(C)の循環



吉村 寿紘・井上麻夕里：海洋におけるカルシウムの地球科学と安定同位体指標、  
 海の研究 (Oceanography in Japan)、25巻、3号、pp.81~99、2016

# 木材・植物における炭素(C)の循環



[https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin\\_riyou/ondanka/attach/pdf/shinrinshoui-12.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/attach/pdf/shinrinshoui-12.pdf)

# 環境配慮型コンクリートの技術の現状

サーキュラーエコノミー(資源循環)に資するコンクリート

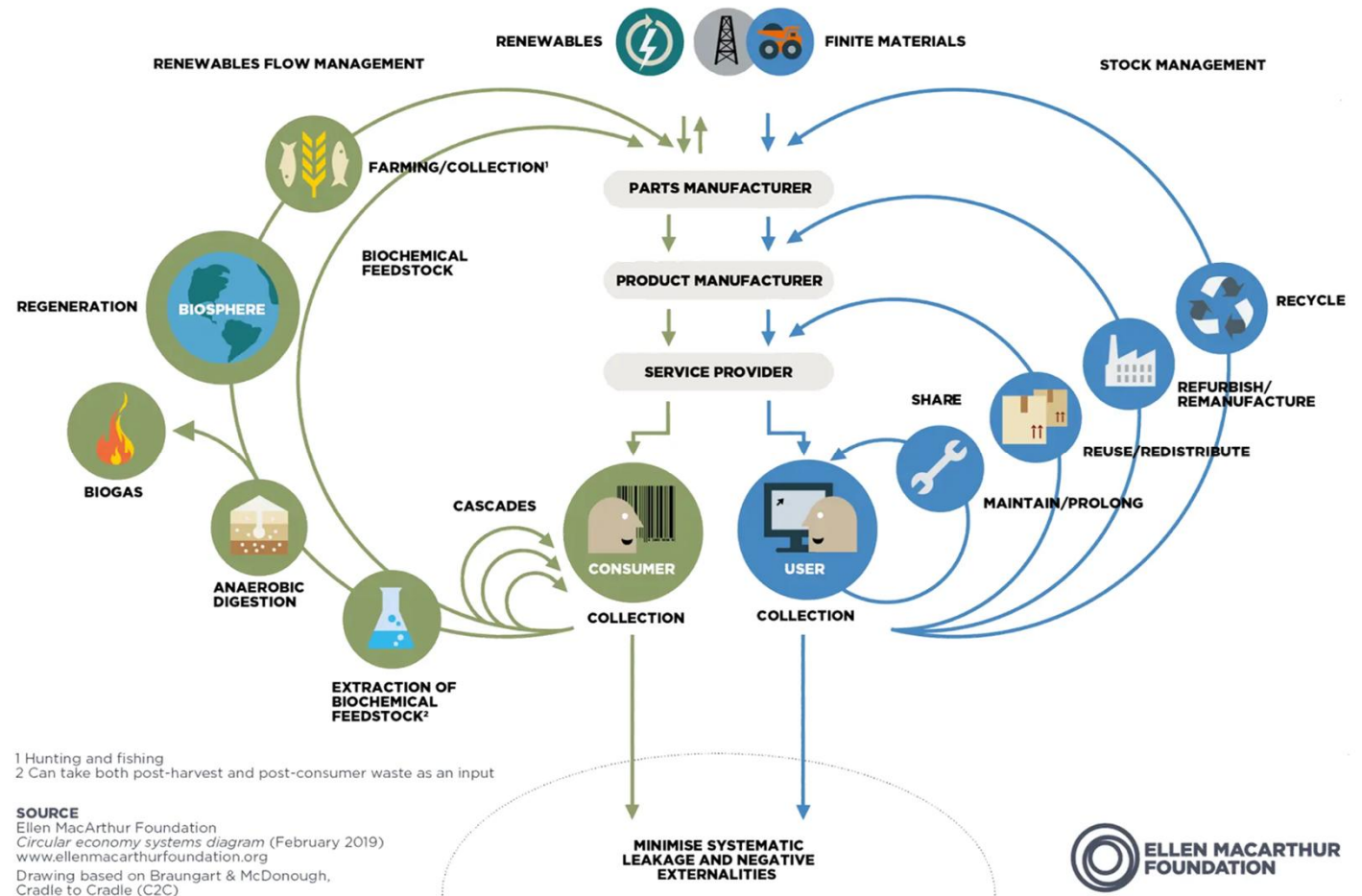


# サーキュラーエコノミーとは

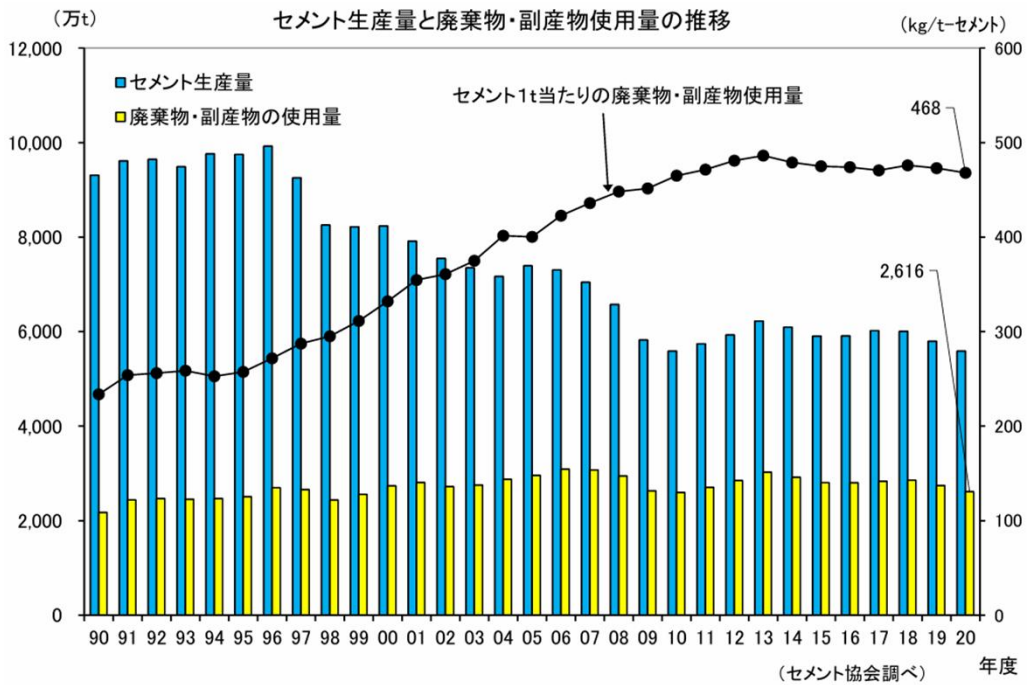
## ■サーキュラーエコノミー

□従来の3Rの取組に加え、  
資源投入量・消費量を抑えつつ、  
ストックを有効活用しながら、  
サービス化等を通じて付加価値を生み出す  
経済活動

- ◆資源・製品の価値の最大化
- ◆資源消費の最小化
- ◆廃棄物の発生抑止



# セメント生産における廃棄物・副産物利用



[https://www.rpsj.org/wp-content/uploads/2021/10/S39\\_08\\_Hosokawa.pdf](https://www.rpsj.org/wp-content/uploads/2021/10/S39_08_Hosokawa.pdf)



<https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html>

# コンクリート(建材含む)における副産物利用(混和材、骨材)

## ■混和材(利用量／発生量、利用割合)

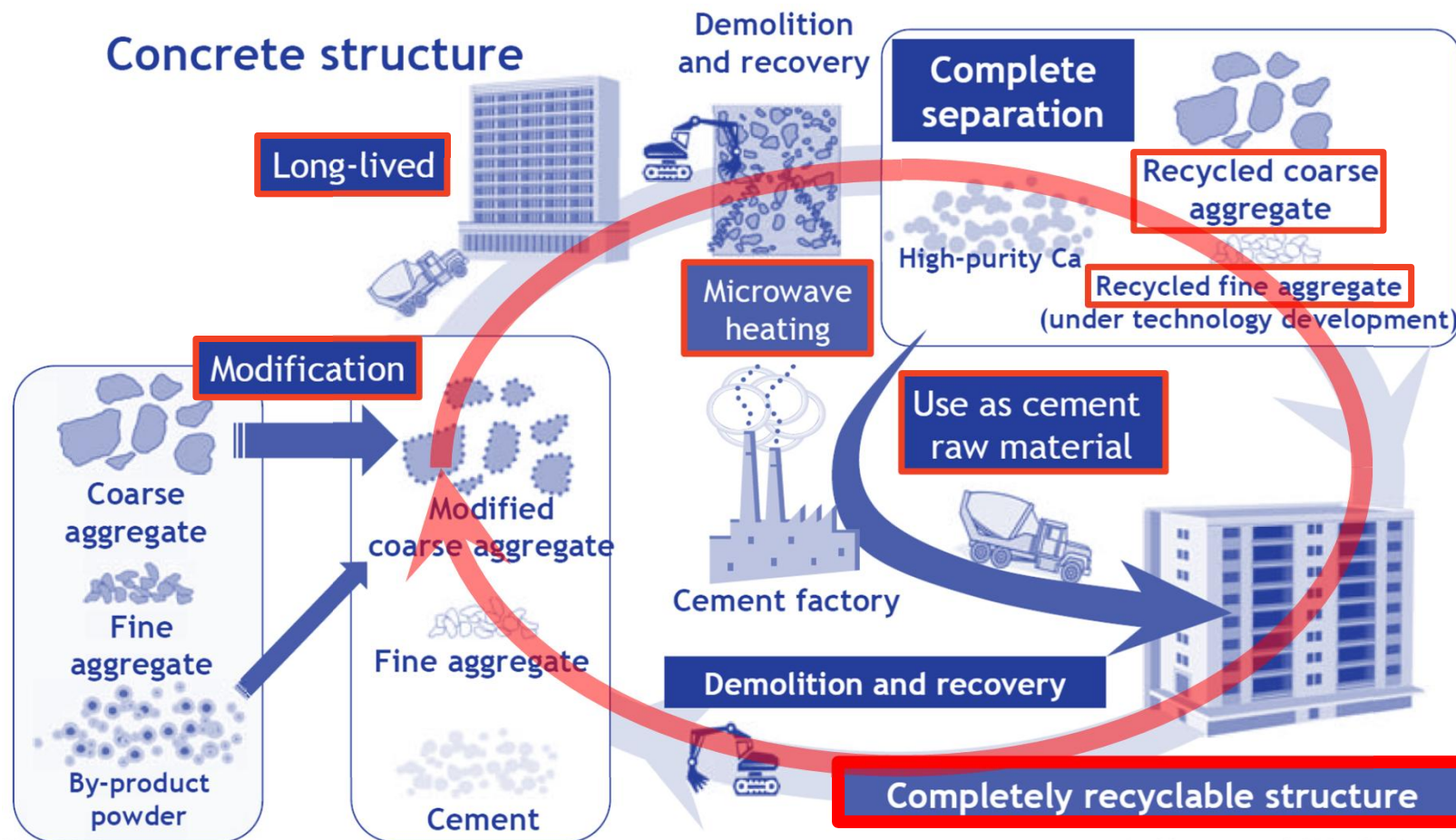
□高炉スラグ微粉末(高炉セメント含む)	(670	／1,890万トン、35%)
□フライアッシュ(セメント混合材・建材ボード用含む)	( 74	／1,200万トン、6%)
□再生骨材	( 11	／3,690万トン、0.3%)

## ■骨材(利用量／発生量、利用割合)

□高炉スラグ骨材	( 75	／1,890万トン、4%)
□フェロニッケスラグ骨材	( 2	／ 181万トン、1%)
□銅スラグ骨材	( 18	／ 354万トン、5%)
□電気炉酸化スラグ骨材	( 8	／ 245万トン、3%)
□石炭ガス化スラグ骨材	( 0.01	／ 3万トン、0.3%)
□溶融スラグ骨材	( 11	／ 80万トン、14%)

鉄鋼スラグ協会「鉄鋼スラグ統計年報」(2024年度版)  
一般財団法人カーボンフロンティア機構「石炭灰全国実態調査報告書」(2025)  
経済産業省「砕石等統計年報」(2019)  
「建設リサイクル、Vol.90」(2020)  
日本コンクリート工学会「月刊コンクリート技術」(2022年12月)

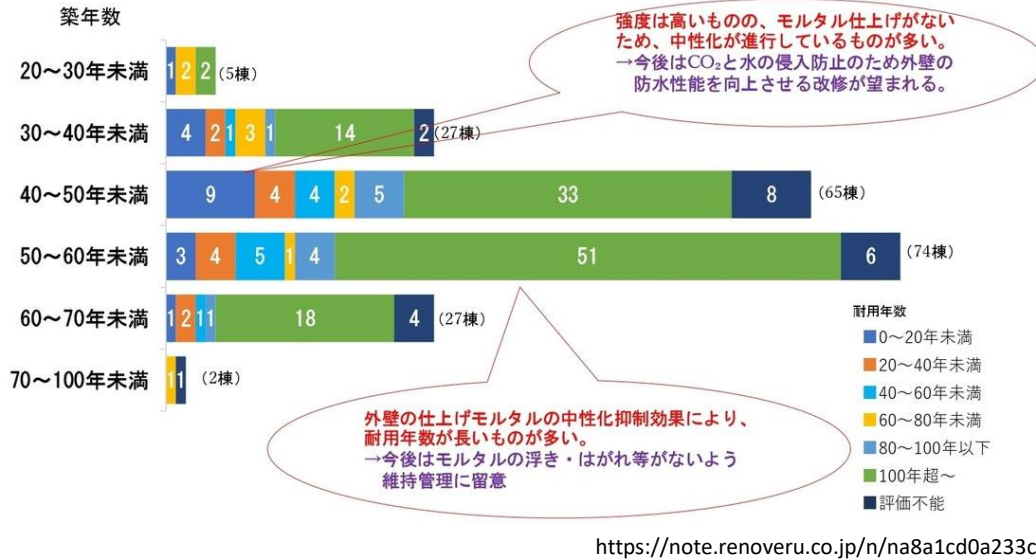
# 完全リサイクルコンクリート



# 長寿命化

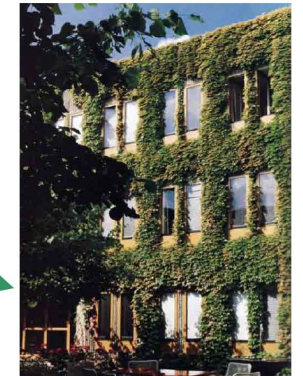
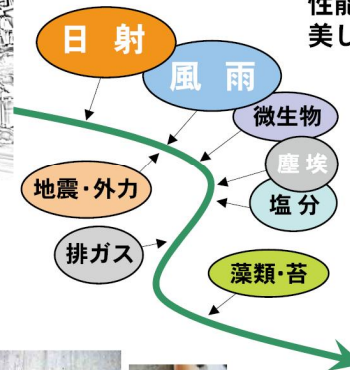
## 耐用年数評価案件(200棟)の概要 3 (2019.5~2024.3の評価完了分)

### 築年数別の耐用年数の分布状況



長期間に渡り様々な劣化因子に曝されることで  
建築物は加齢してゆく

設計・材料選定・維持保全を適切に行うことで  
性能を保ち続けられるか  
美しく老化させることができるか



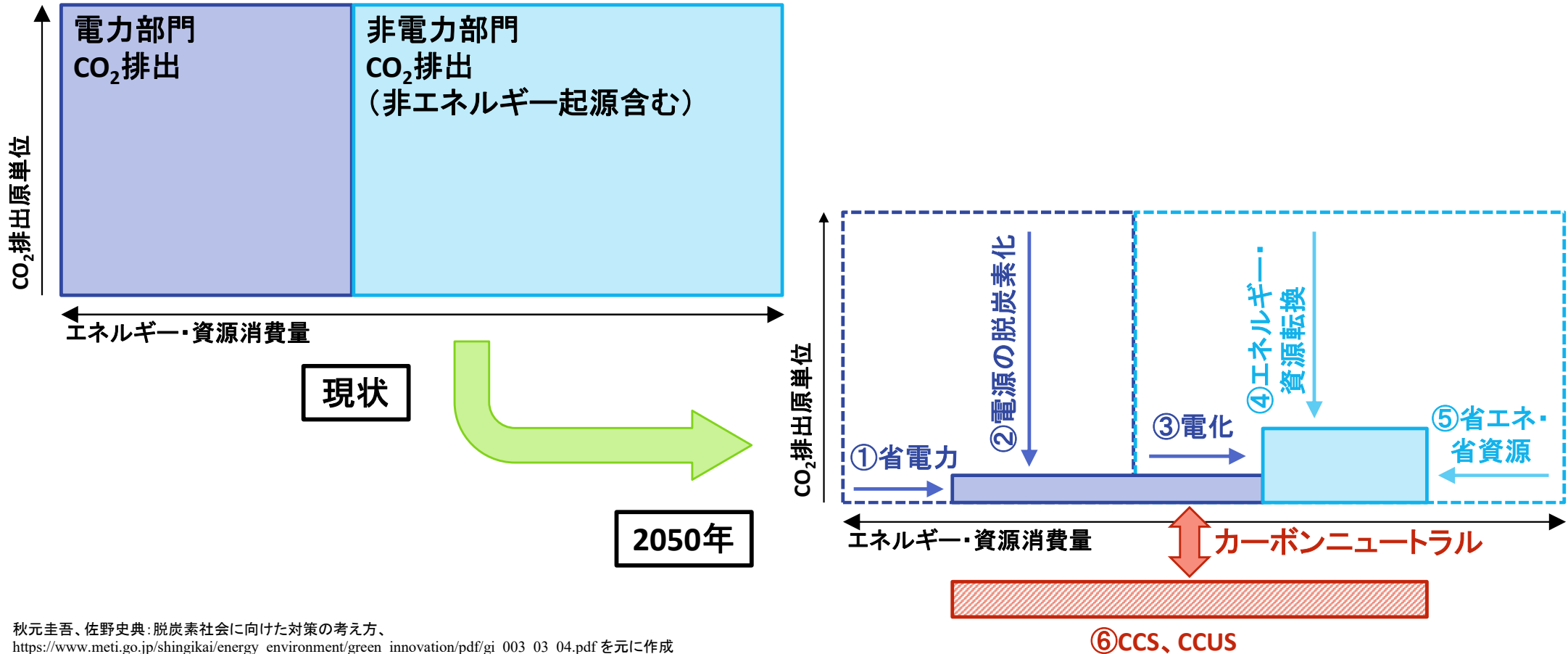
野口貴文: RC造建築物の耐久性・維持保全ー建築ゲノム論に基づく劣化予測・性能評価ー、  
ベース設計資料、No.177、pp.13-16、2018

# 環境配慮型コンクリートの技術の現状

カーボンニュートラル(脱炭素)に資するコンクリート

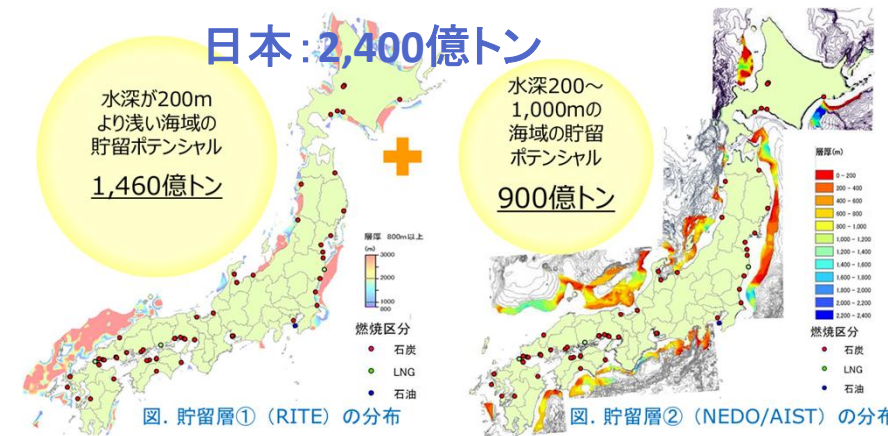
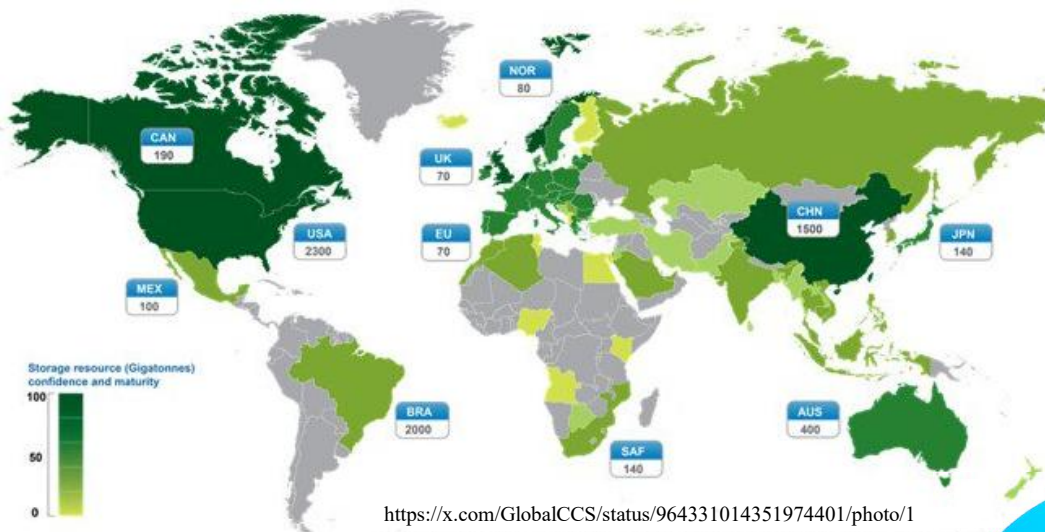


# カーボンニュートラル化のイメージ

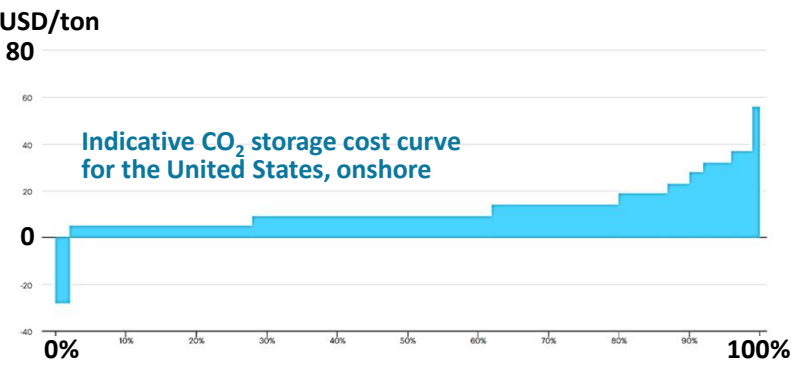


秋元圭吾、佐野史典: 脱炭素社会に向けた対策の考え方、  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/green\\_innovation/pdf/gi\\_003\\_03\\_04.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_003_03_04.pdf) を元に作成

# CCSポテンシャル



[https://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-1\\_CCUS\\_storage.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-1_CCUS_storage.pdf)



<https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>

Total cumulative mass of CO<sub>2</sub> required to be stored to meet climate targets by 2050

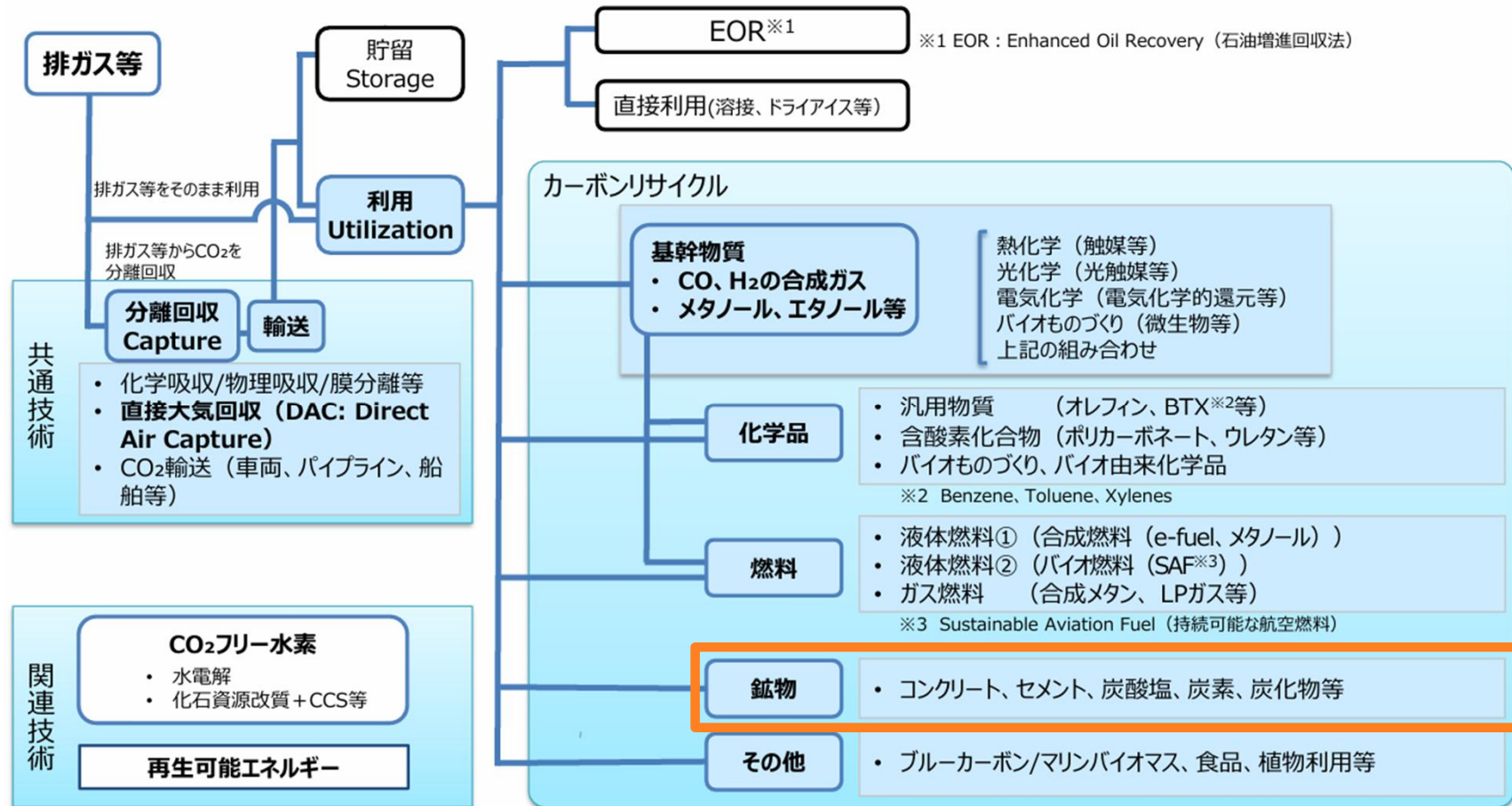
12 GTCO<sub>2</sub>  
Maximum theoretical potential of current CCS project pipeline

<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf>



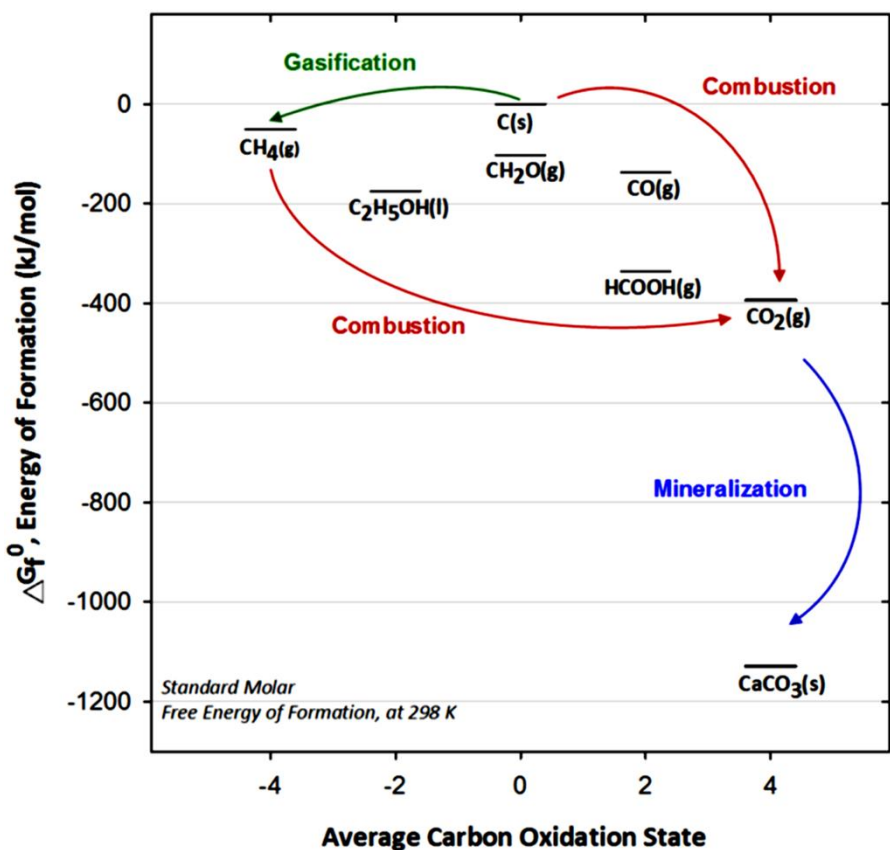
<https://www.city.tomakomai.hokkaido.jp/kigyoritchi/ccs/ccsnogaiyo.html>

# CCUSの方向性



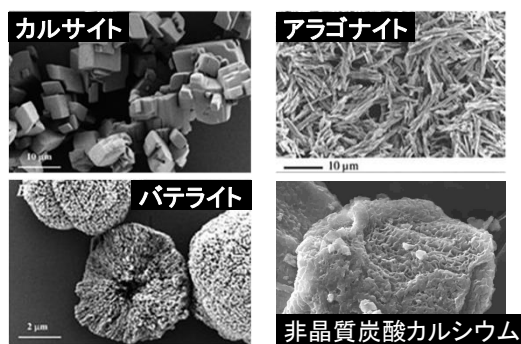
<https://www.env.go.jp/content/000167940.pdf>

# C・Ca化合物のエンタルピー・エントロピー・自由エネルギー

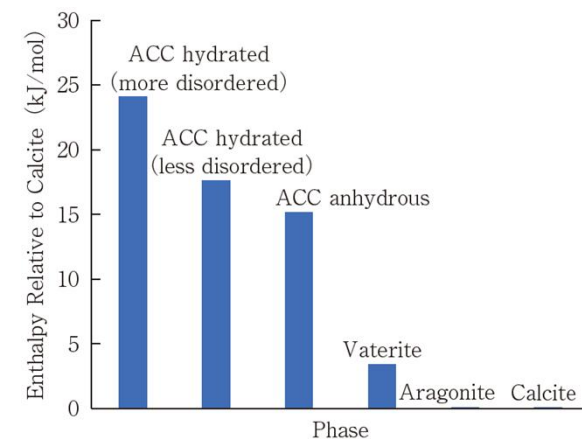


Shu-Yuan Pan, Andrew Chiang, E-E Chang, Yi-Pin Lin, Hyunook Kim, Pen-Chi Chiang: An Innovative Approach to Integrated Carbon Mineralization and Waste Utilization: A Review, Aerosol and Air Quality Research, Vol.15, pp.1072-1091, 2015

	エンタルピー (kJ/mol)	エントロピー (J/mol·K)	ギブス自由エネルギー (kJ/mol)
CaO (s)	-635	38	-604
Ca(OH) <sub>2</sub> (s)	-986	83	-899
CaCO <sub>3</sub> (s) - Aragonite	-1207	89	-1128
CaCO <sub>3</sub> (s) - Calcite	-1207	93	-1129
CaSO <sub>4</sub> ·0.5H <sub>2</sub> O (s)	-1575	134	-1436
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (s)	-2023	194	-1797
CO <sub>2</sub> (g)	-394	214	-394
SO <sub>2</sub> (g)	-297	248	-300



Ana M. Ferreira, Anna S. Vikulina, Dmitry Volodkin: CaCO<sub>3</sub> crystals as versatile carriers for controlled delivery of antimicrobials, Journal of Controlled Release, Vol.328, pp.470-489, 2020



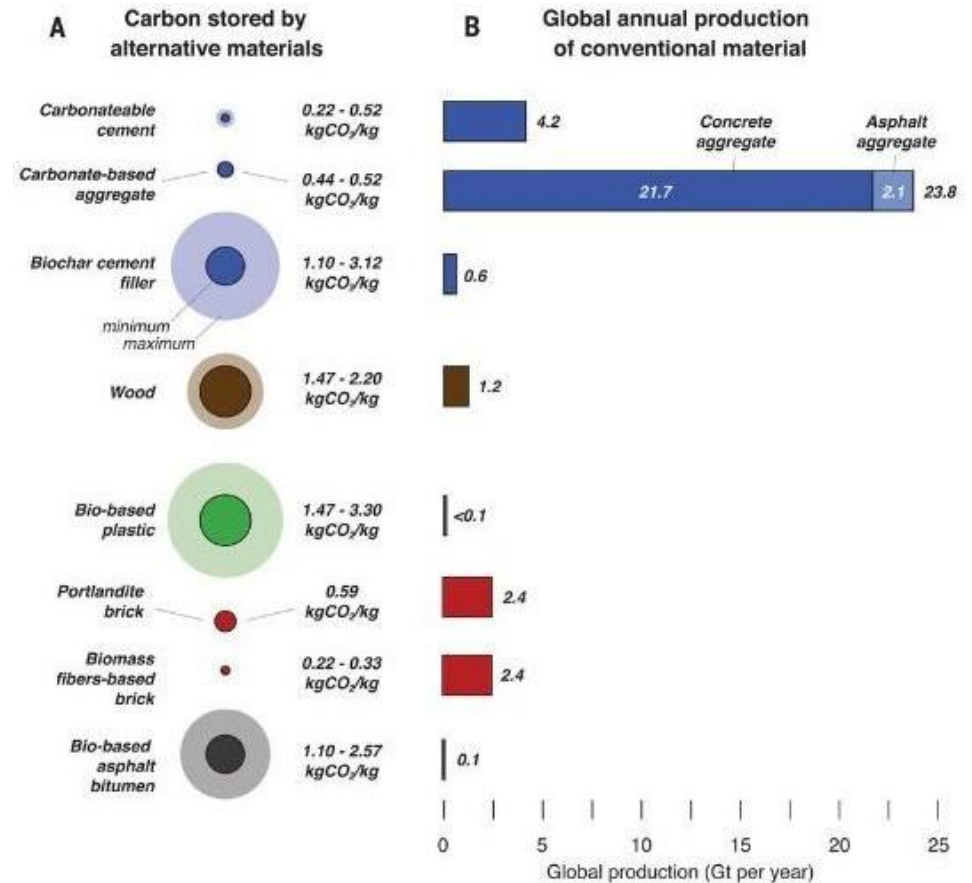
丸山一平・栗原諒・佐伯直彦：セメント系材料の炭酸化反応機構、コンクリート工学、61巻9号、pp.760-768、2023年

# 建設材料のCO<sub>2</sub>吸収固定ポテンシャル

- 建設材料によるCO<sub>2</sub>固定
- 160億トン／年(ポテンシャル)

## □ コンクリート材料

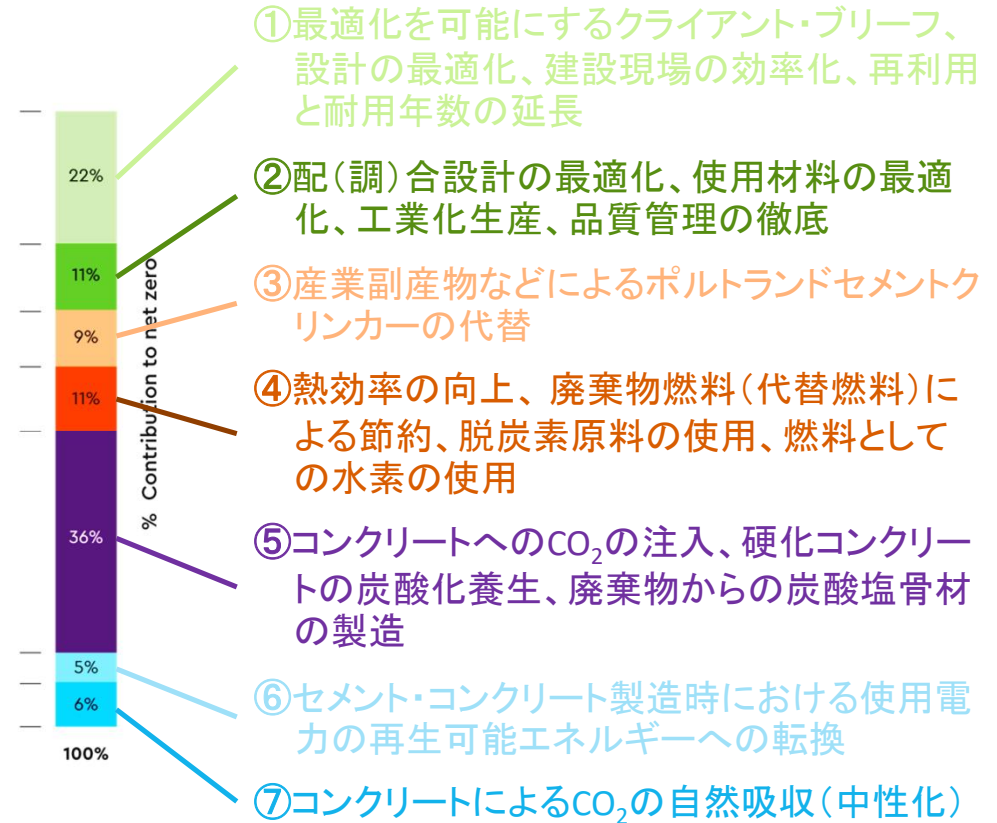
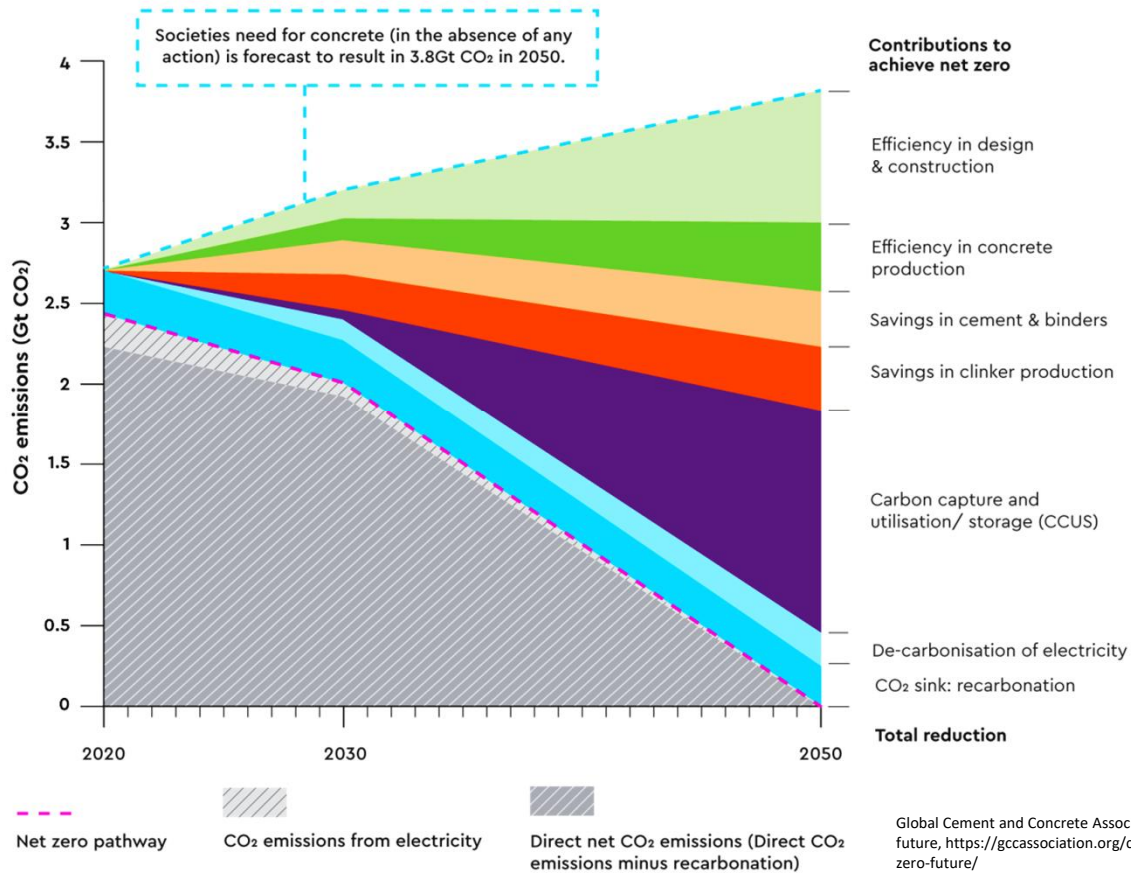
- ◆ セメント 13±5億トン
- ◆ 骨材 105±10億トン
- ◆ 混和材 13±6億トン



Elisabeth Van Roijen et al.: Building materials could store more than 16 billion tonnes of CO<sub>2</sub> annually, Science, Vol.387, pp.176-182, DOI:10.1126/science.adq8594, 2025

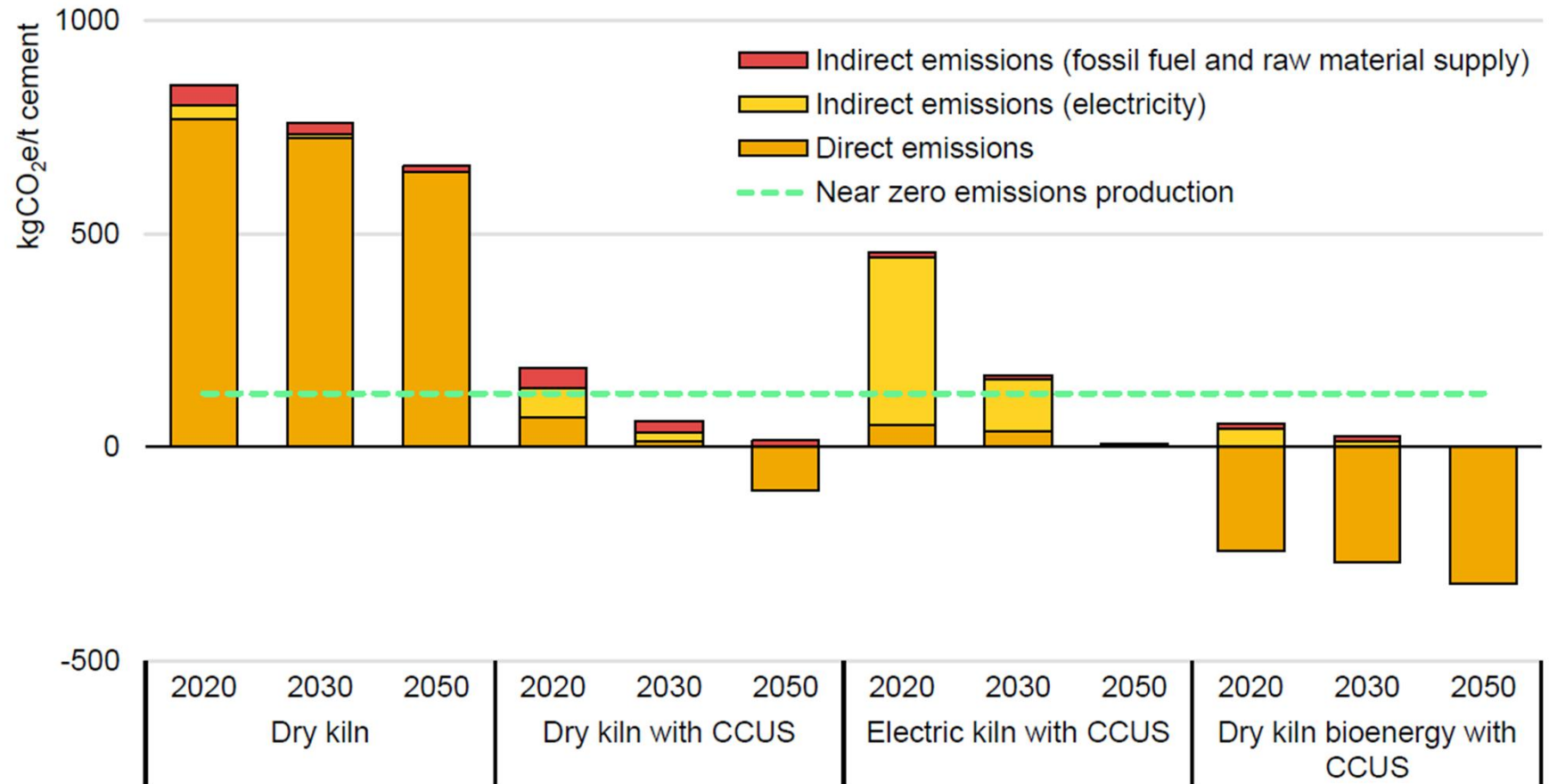
# セメント・コンクリートの地球温暖化抑制シナリオ (GCCA)

## GETTING TO NET ZERO





# セメント生産時のカーボンニュートラル化：④⑤⑥



<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c4d96342-f626-4aea-8dac-df1d1e567135/AchievingNetZeroHeavyIndustrySectorsinG7Members.pdf>

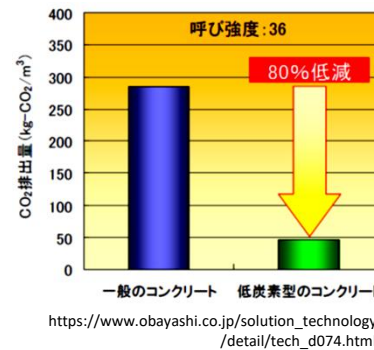
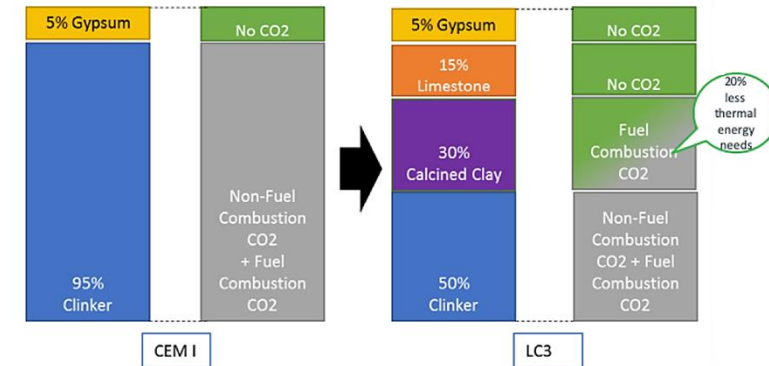
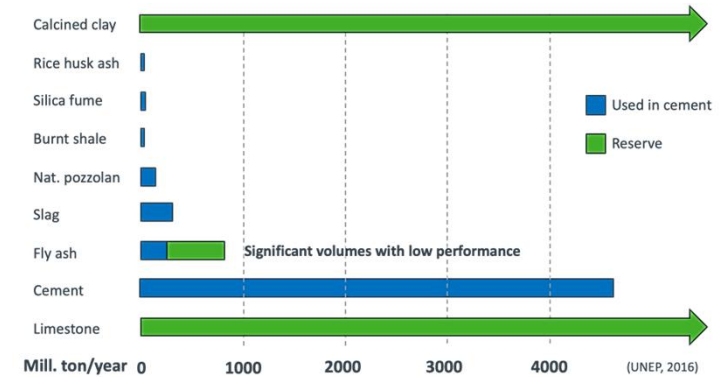


# コンクリート製造時のCO<sub>2</sub>排出削減: ③

## ■ポルトランドセメントを削減したコンクリート

- LC<sup>3</sup> (Limestone Calcined Clay Cement)
- 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、シリカフュ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、調合の検討が重要



<https://lc3.ch/>

# コンクリート製造時のCO<sub>2</sub>排出削減: ③

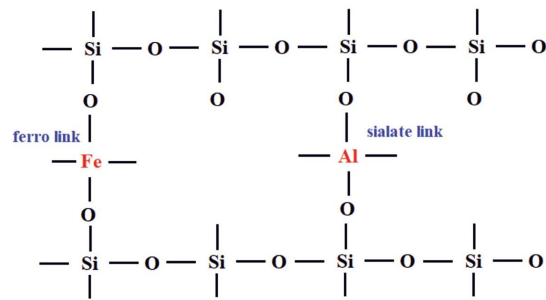
## ■セメントクリンカーを使用しないコンクリート

### □サスティンクリート(三井住友建設)

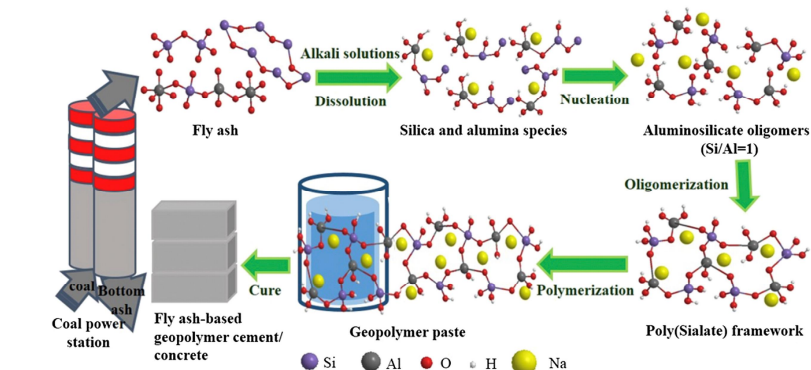
- ◆ 結合材として、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェーム、アルカリ刺激材(膨張材)を用いたコンクリート

### □ジオポリマー

- ◆ アルミナシリカ粉末とアルカリ溶液の縮重合反応で生じる固化体の総称



<https://www.nbmcw.com/product-solutions/concrete-chemicals-waterproofing-repairs/concrete-articles/ferro-sialate-geopolymer-using-red-mud.html>



Zhuang, X.Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C.H., Tong, D.S., Yang, H.M., Yu, W.H., Wang, H.: Fly ash-based geopolymer, Clean production, properties and applications, Journal of Cleaner Production, Vol.125, pp.253-267, 2016



<https://www.civilengineeringforum.me/geopolymer-concrete/>

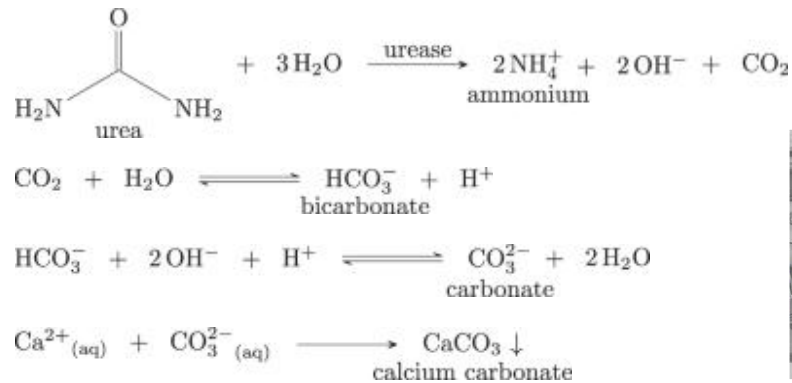


<https://theconstructor.org/concrete/geopolymer-concrete-ecofriendly-construction-material/9430/>

# バイオ・ミネラリゼーションによるバイオ・コンクリート:⑤

## ■ バクテリアと尿を利用して骨材を結合するコンクリート(ドイツ・The University of Stuttgart、“SimBioZe”プロジェクト)

- ① バクテリアを含む粉末と骨材を型枠に充填
- ② カルシウムを濃縮した尿を骨材間に通水(3日間)
- ③ バクテリアによる尿素の分解(+副産物:肥料)
- ④ 炭酸カルシウムの結晶成長
- ⑤ バイオ・コンクリートとして固化  
(15cm、5MPa→50MPa:工業用尿素利用)



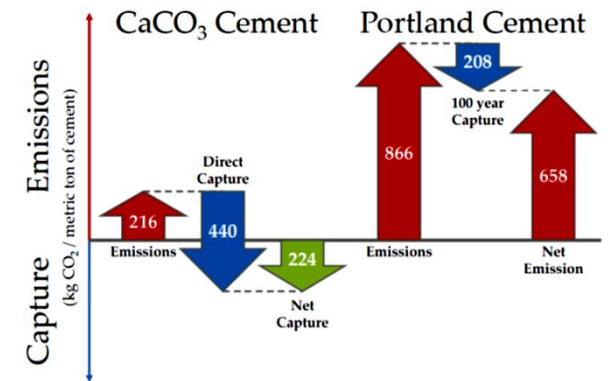
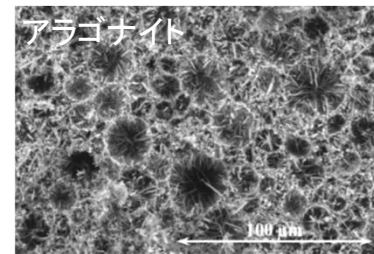
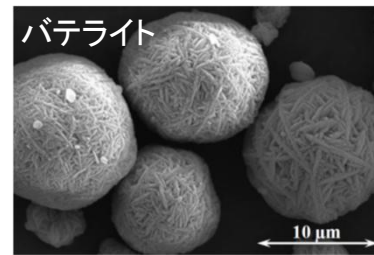
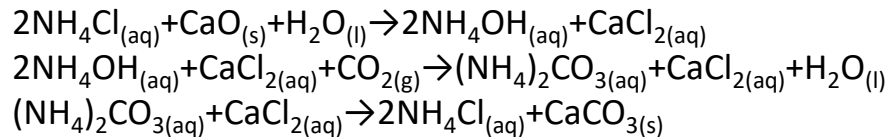
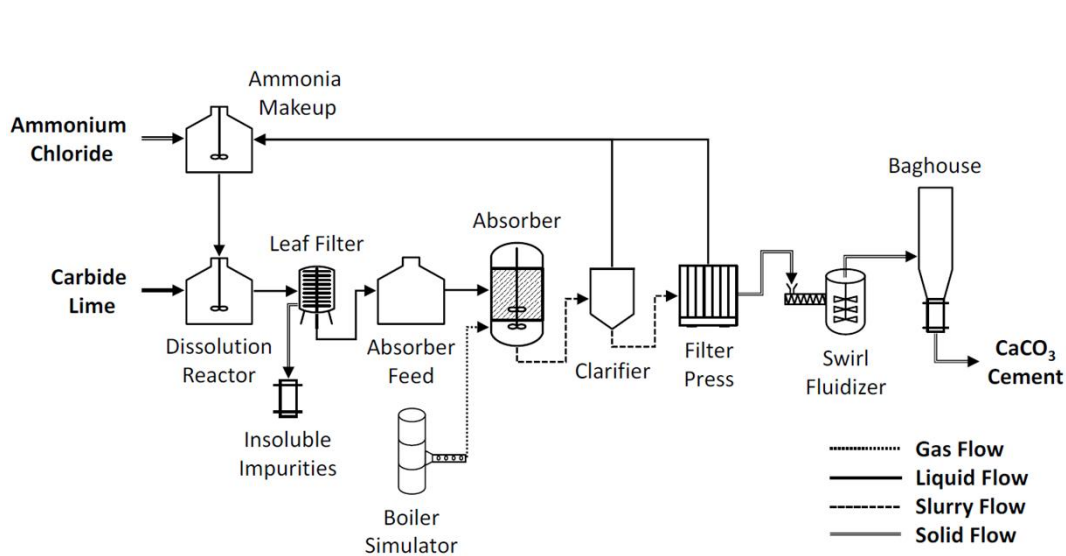
Smirnova, M., Nething, C., Stolz, A. et al. High strength bio-concrete for the production of building components. npj Mater. Sustain. 1, 4 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44296-023-00004-6>



<https://www.uni-stuttgart.de/en/university/news/all/Bio-concrete-from-urine/>

# 人造炭酸カルシウム(バテライト)の結合材利用: ⑤

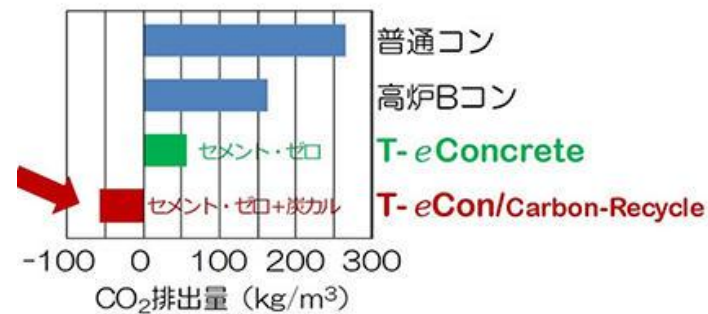
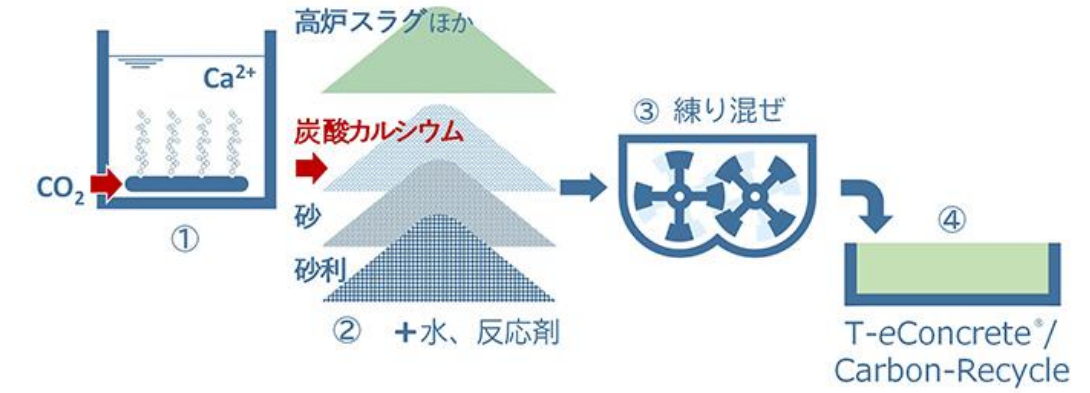
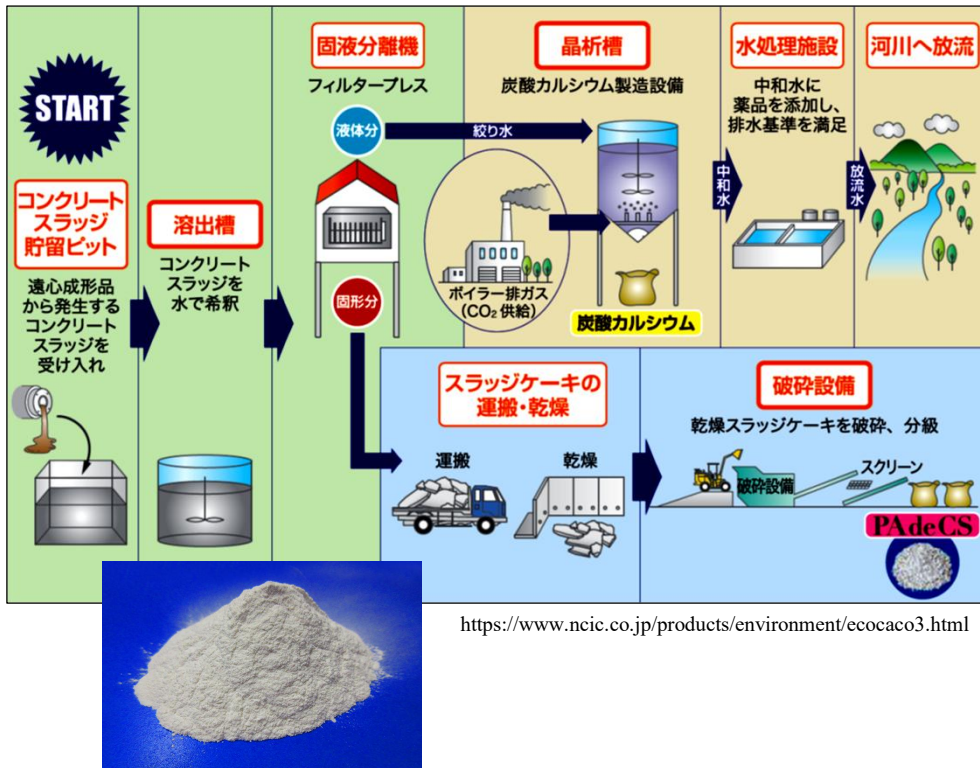
## ■CO<sub>2</sub>を利用して炭酸カルシウムセメントを製造(米国・Fortera: ReAct)



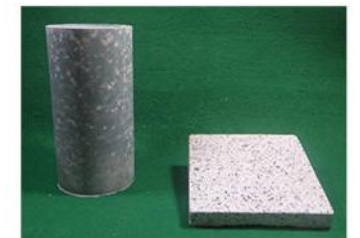
Craig W. Hargis, et al: Calcium Carbonate Cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technique, Materials, Vol.14, 2709, <https://doi.org/10.3390/ma14112709>, 2021

# 人造炭酸カルシウムの混和材利用: ⑤

■ CO<sub>2</sub>を利用して混和材を製造し、混和材として利用(日本コンクリート工業:エ  
コタンカル、大成建設:T-eConcrete/Carbon-Recycle)



https://www.taisei.co.jp/about\_us/wn/2021/210216\_5079.html

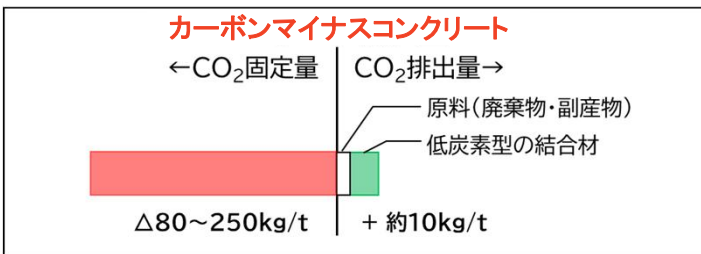
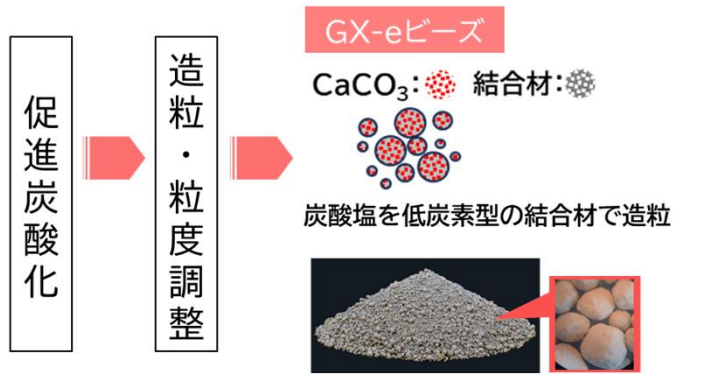


(圧縮強度 20~45N/mm<sup>2</sup>)

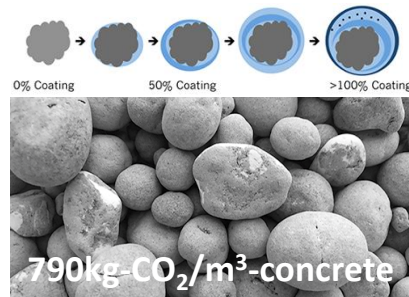
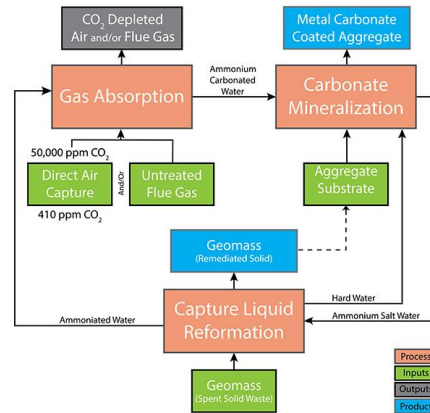
左: 試験体、右: 石材調建材加工例

# 人造炭酸塩を造粒して骨材利用: ⑤

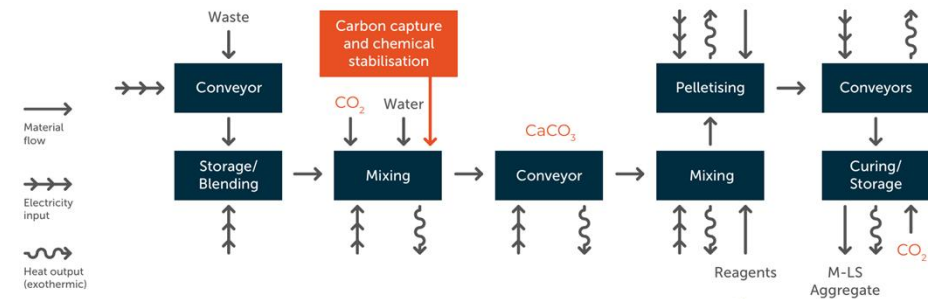
■ CO<sub>2</sub>を利用して骨材を製造 (UBE三菱セメント、米国・Blue Planet、英国・Blue Planet Technology、英国・Carbon 8)



[https://www.mu-cc.com/information/20240128\\_01.html](https://www.mu-cc.com/information/20240128_01.html)



<https://www.blueplanetsystems.com/products>



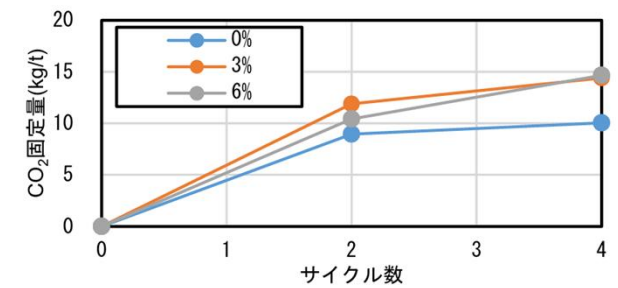
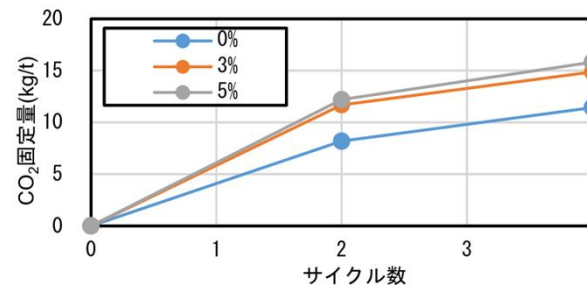
<https://oco.co.uk/sustainable-construction-products/>



<https://www.carbon8.co.uk/products>

# 戻りコンクリートを造粒・炭酸化して骨材利用: ⑤

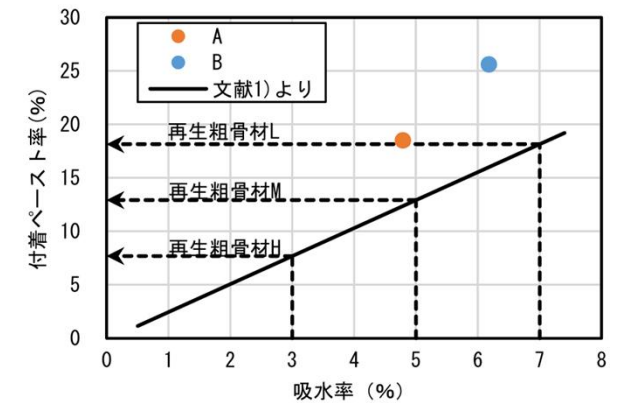
- 残コンクリート・戻りコンクリート由来の粒状化骨材を炭酸化 (CPコンソ・CP粒状化骨材)



<https://carbon-pool.com/project/event/2024-07-17.html>



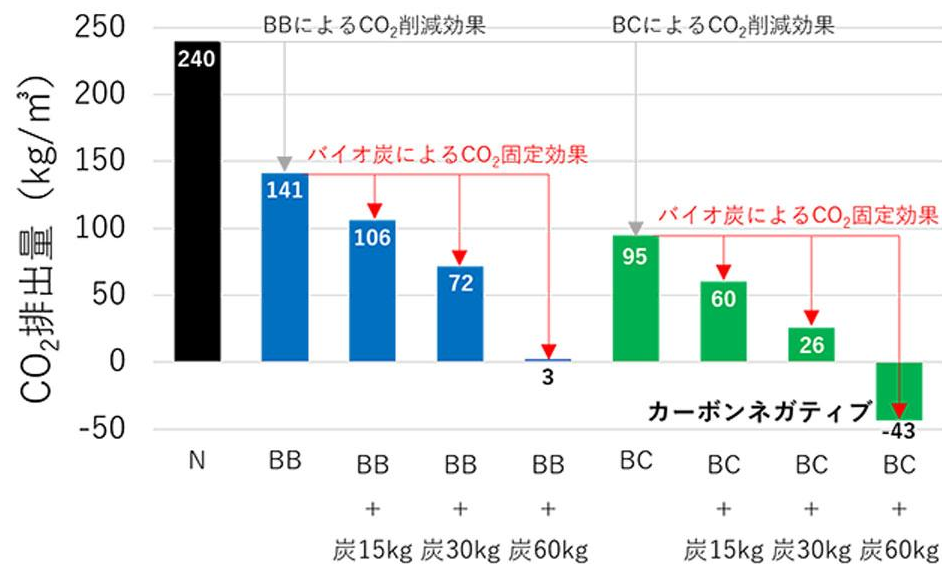
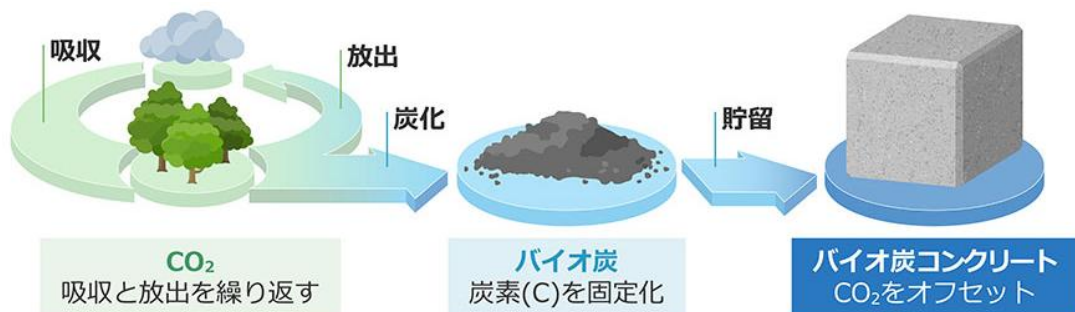
<https://carbon-pool.com/project/event/2024-07-1.html>



[https://data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/45/045-01-1002.pdf](https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/45/045-01-1002.pdf)

# バイオ炭の混和材・骨材利用:⑤

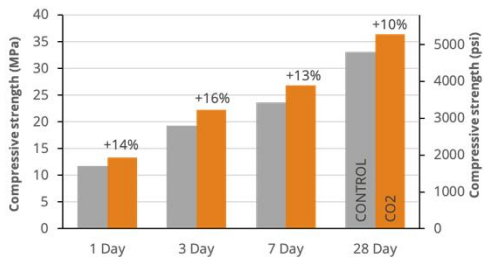
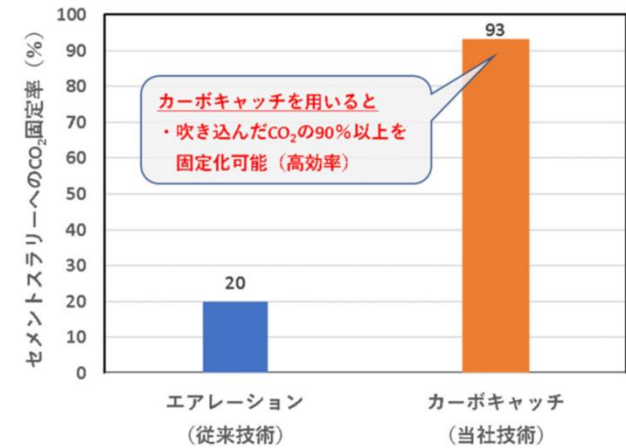
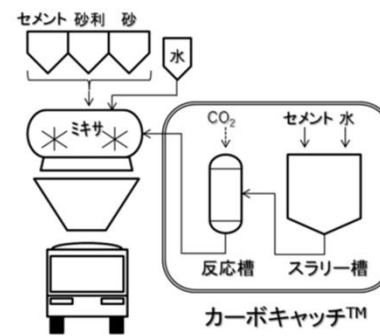
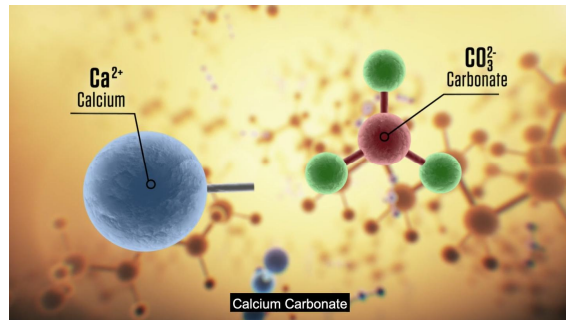
■ バイオマスを炭化した「バイオ炭」を混和材として利用(清水建設:バイオ炭コンクリート)



<https://www.shimz.co.jp/solution/tech383/>

# 生コンクリートへのCO<sub>2</sub>の注入: ⑤

## ■生コンクリートにCO<sub>2</sub>を注入(カナダ・CarbonCure Technologies、太平洋セメント)

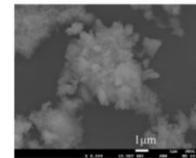


CarbonCure for Ready Mix  
15kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-concrete



CarbonCure for Precast  
15~23kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-concrete

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



一般のコンクリート

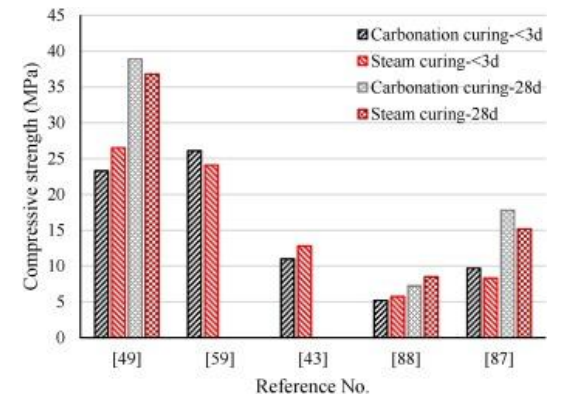
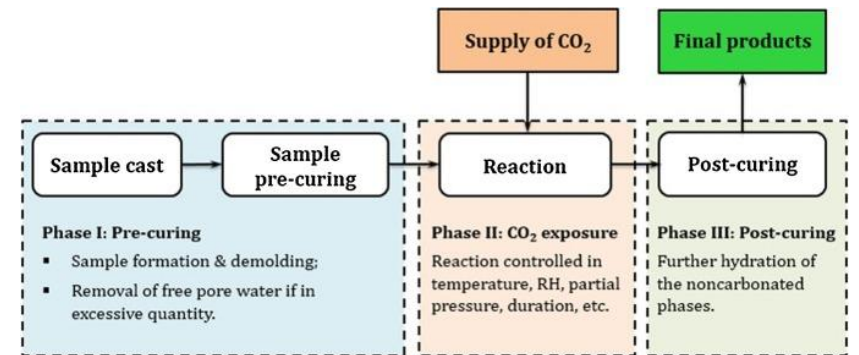
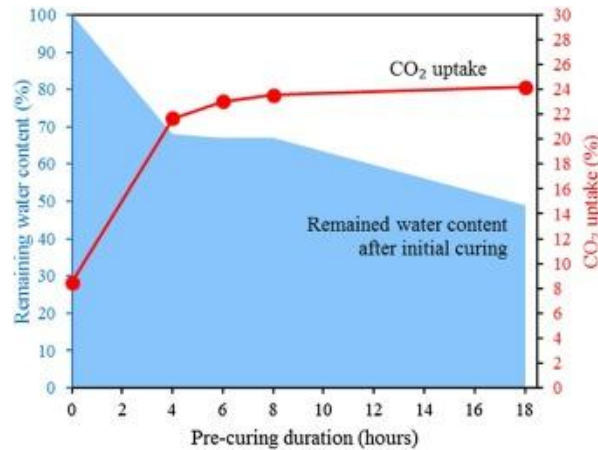
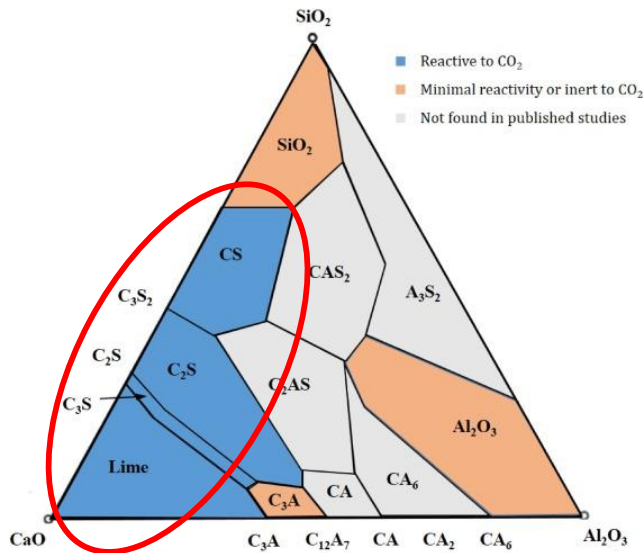
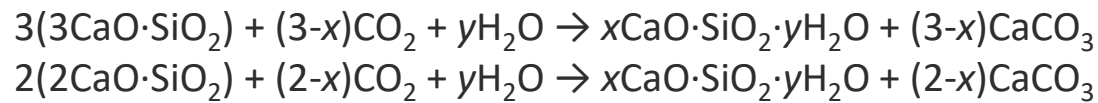
カーボキャッチ・スラリーを用いてCO<sub>2</sub>を固定化したコンクリート



[https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/230315\\_1.pdf](https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/230315_1.pdf)

# 炭酸化養生(普通セメントを用いたコンクリート): ⑤

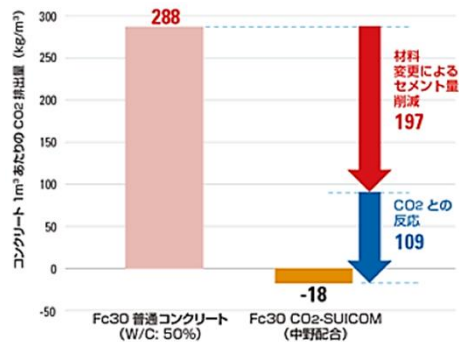
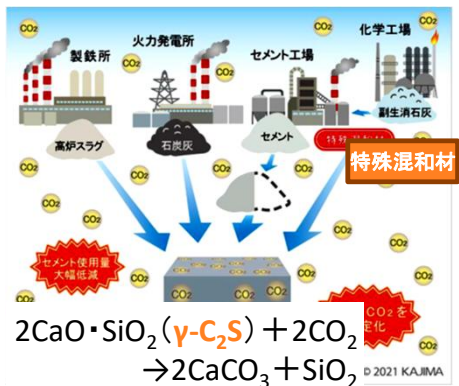
## ■炭素化養生によるCO<sub>2</sub>吸収・固定化および強度増進



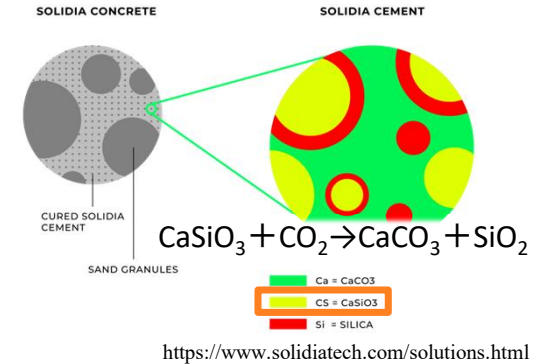
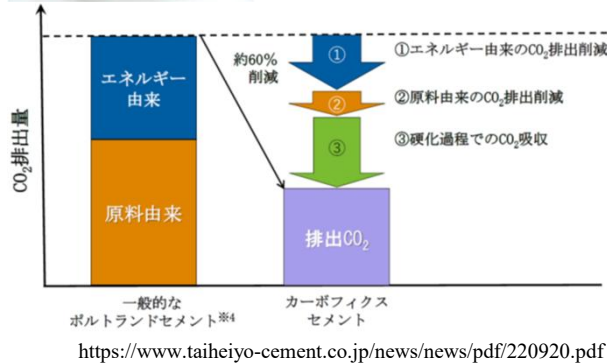
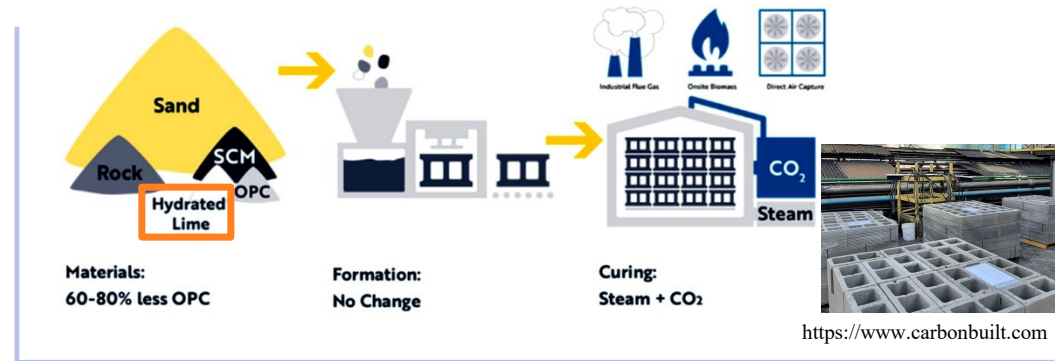
Duo Zhang, Zaid Ghoulch, Yixin Shao: Review on carbonation curing of cement-based materials, Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, Vol.21, pp.119-131, 2017

# 炭酸化養生 (CO<sub>2</sub>反応セメントを用いたコンクリート) : ⑤

■ CO<sub>2</sub>と反応・硬化する結合材を用いたコンクリート (鹿島建設・デンカ:  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S、太平洋セメント:  $\beta$ -C<sub>2</sub>S、米国・CarbonBuilt: Ca(OH)<sub>2</sub>、米国・Solidia: CS)

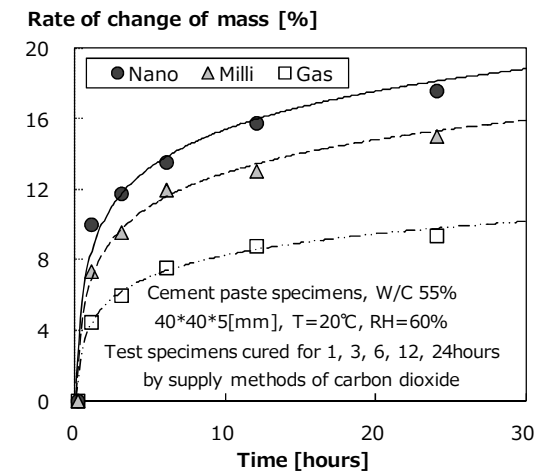


[https://www.kajima.co.jp/news/digest/jun\\_2012/searching/index-j.html](https://www.kajima.co.jp/news/digest/jun_2012/searching/index-j.html)



# 構造物へのCO<sub>2</sub>の供給(強制・自然):⑤

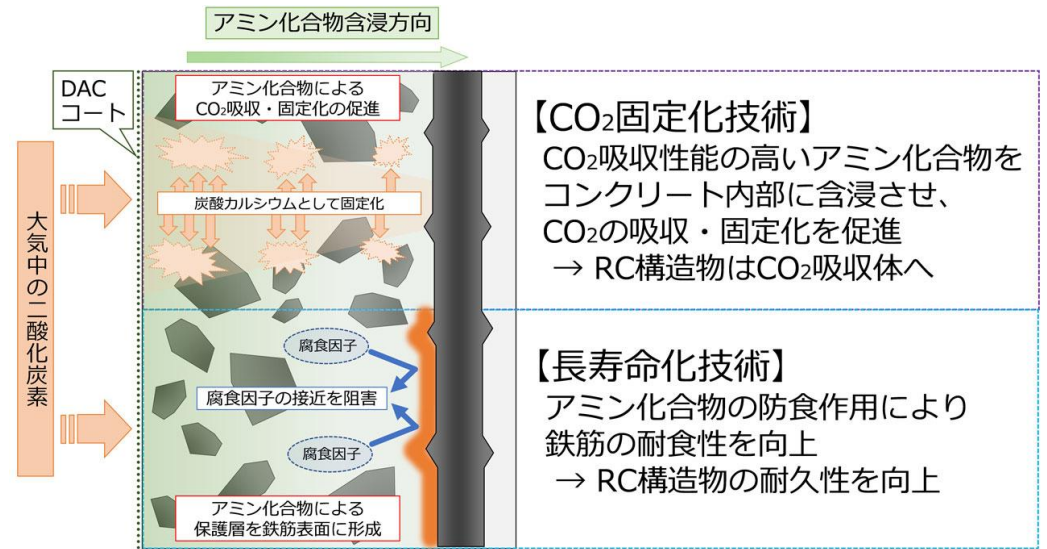
## ■CO<sub>2</sub>ナノバブル水噴霧による表層緻密化(東京大学・小泉製麻、NCガード)



<https://www.kenzai-navi.com/makers/koizumiseima/39596>



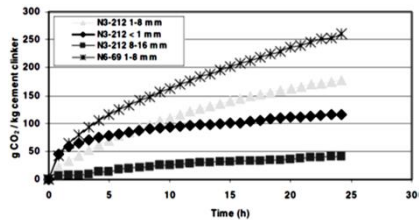
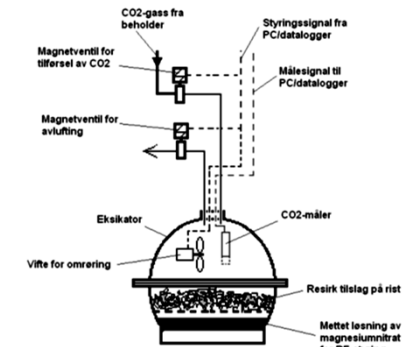
## ■アミン化合物によるCO<sub>2</sub>吸収(北海道大学・清水建設、DACコート)



<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/2022017.html>

# 解体コンクリート塊へのCO<sub>2</sub>の供給: ⑤

## ■ 解体コンクリートを炭酸化した再生砕石・再生骨材

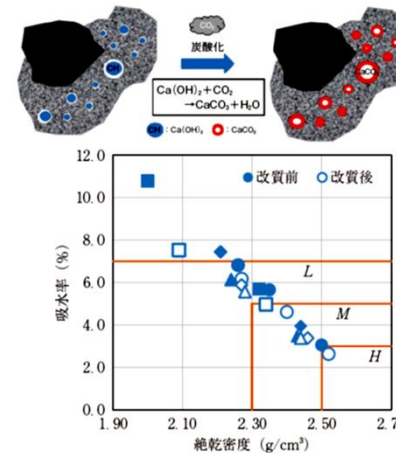
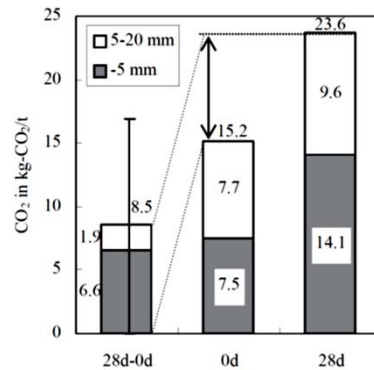
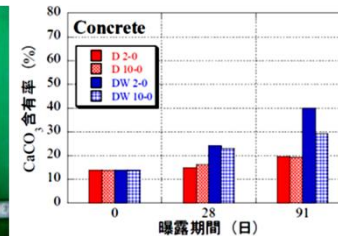


Engelsen, C. J., Mehus, J., Pade, C. and Sæther, D. H., (2005): Carbon dioxide uptake in demolished and crushed Concrete, Nordic Innovation Centre Project No.03018, Norwegian Building Research Institute

曾根真理・神田太朗: コンクリート塊の再資源化による二酸化炭素固定—建設リサイクルを通じた吸収作用の保全・強化の展望、建設の施工企画, No.742, pp.9-13, 2011-12



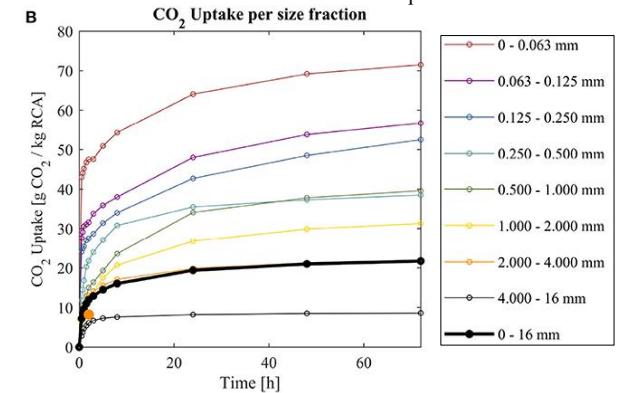
黒田泰弘・菊地俊文: コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究、清水建設研究報告、第86号、2007年10月



伊代田岳史: CO<sub>2</sub>吸着による再生骨材改質とコンクリートへの適用、コンクリート工学, Vol.59, No.9, 807-812, 2021



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



Johannes, Braune Lisa, Bauer Christian, Sacchi Romain, Mazzotti Marco: Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector, Frontiers in Climate, Vol.3, 2021



# 建造物の自然炭酸化(中性化): ⑦

## ■コンクリートの中性化(炭酸化)

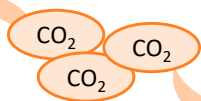
EN 16757: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product category rules for concrete and concrete elements

Annex G (informative): CO<sub>2</sub> uptake by carbonation - Guidance on calculation

$$CO_2 \text{ uptake} = k \times (\sqrt{t} / 1000) \times U_{tcc} \times C \times (D_c)$$

理論的最大吸収量

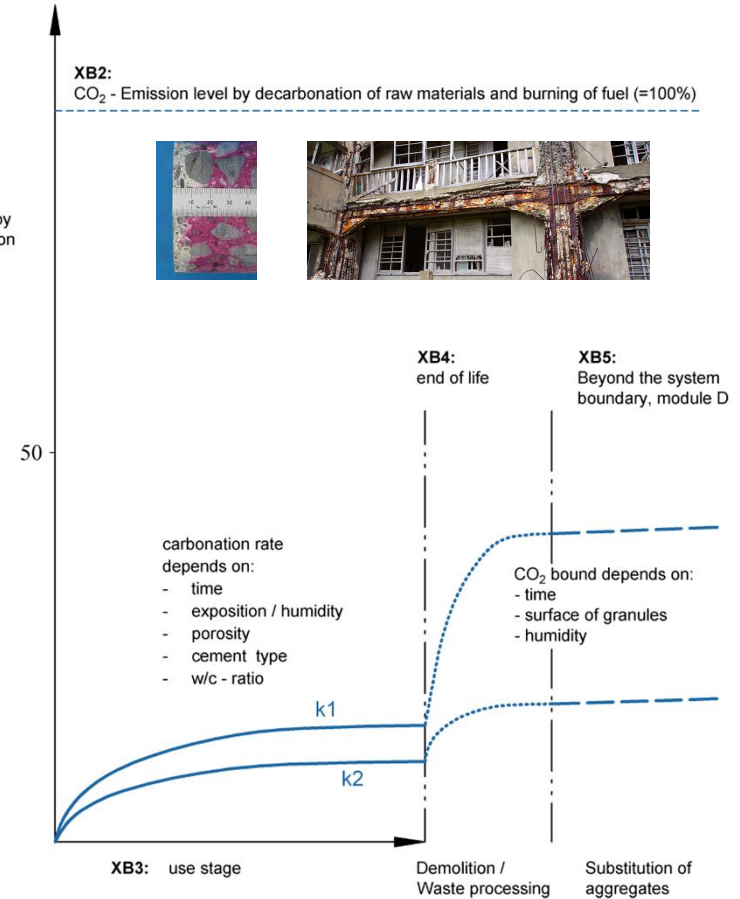
ポルトランドセメント: 0.49kg/kg-cement



Concrete strength class	< 16 MPa	16 to 20 MPa	25 to 35 MPa	> 35 MPa	Degree of carbonation (D <sub>c</sub> )
Parameters	Value of k-factor, in mm/year <sup>0.5</sup>				Percentage
<b>Civil engineering structures</b>					
Exposed to rain		2,7	1,6	1,1	85
Sheltered from rain		6,6	4,4	2,7	75
In ground <sup>a</sup>		1,1	0,8	0,5	85
<b>Buildings</b>					
<u>Outdoor</u>					
Exposed to rain	5,5	2,7	1,6	1,1	85
Sheltered from rain	11	6,6	4,4	2,7	75
<u>Indoor in dry climate <sup>c</sup></u>					
With cover <sup>b</sup>	11,6	6,9	4,6	2,7	40
Without	16,5	9,9	6,6	3,8	40
In ground <sup>a</sup>		1,1	0,8	0,5	85

<sup>a</sup> Under groundwater level k = 0,2.  
<sup>b</sup> Paint or wall paper. (Under tiles, parquet and laminate k is considered to be 0.)  
<sup>c</sup> Indoor in dry climate means that the RH is normally between 45 % and 65 %.

CO<sub>2</sub> (%) rebound by carbonation



# 環境配慮型コンクリートの利用における課題

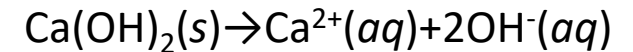
## 技術的課題



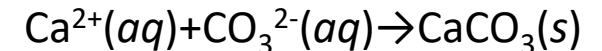
# 炭酸化反応の区分

## ■自然炭酸化 (Direct Air Capture、DAC)

- ◆大気中のCO<sub>2</sub>による硬化体中の液相中での半乾式炭酸化



## ■強制・促進炭酸化



### □乾式炭酸化 (Dry Carbonation)

- ◆高濃度CO<sub>2</sub>条件下での、高温(100°C以上)の乾燥環境下における固体とCO<sub>2</sub>ガスとの直接反応

### □半乾式炭酸化 (Semi-dry Carbonation)

- ◆高濃度CO<sub>2</sub>条件下での、一定湿度範囲の環境下または乾湿繰返し環境下における硬化体の液相中(毛管凝集水中・吸着水中)での反応

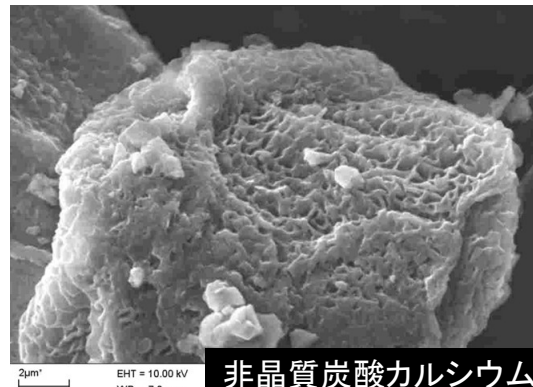
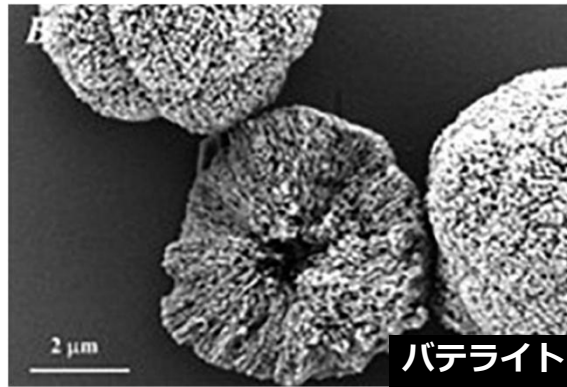
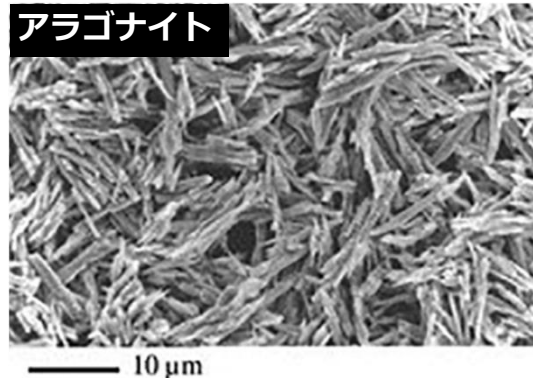
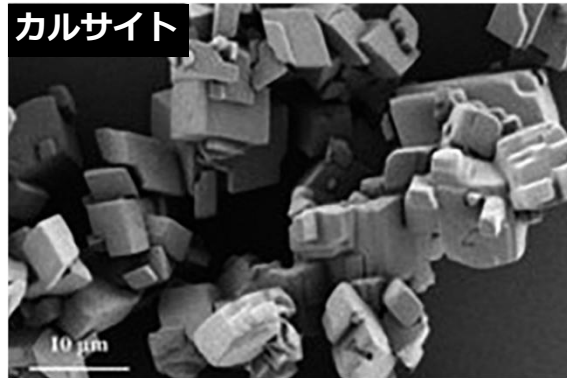
### □半湿式炭酸化 (Semi-wet Carbonation)

- ◆高濃度CO<sub>2</sub>条件下での、ミスト散布による硬化体の液相中での反応

### □湿式炭酸化 (Wet Carbonation)

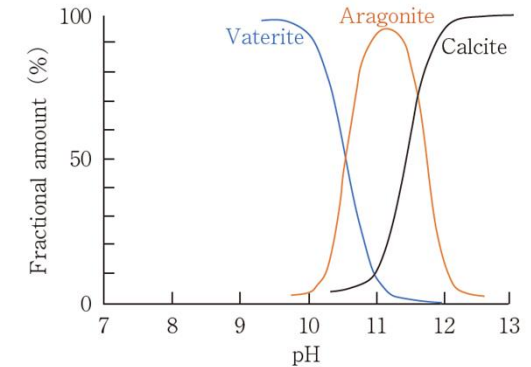
- ◆CO<sub>2</sub>バブリングなどによる水中での、粉体から溶出したCaと溶解したCO<sub>2</sub>との反応

# 炭酸カルシウムの結晶形態の制御

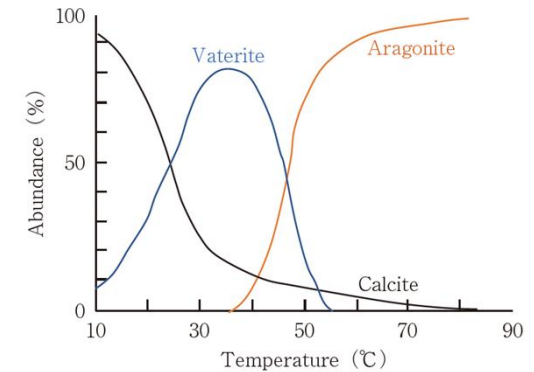


Ana M. Ferreira, Anna S. Vikulina, Dmitry Volodkin: CaCO<sub>3</sub> crystals as versatile carriers for controlled delivery of antimicrobials, Journal of Controlled Release, Vol.328, pp.470-489, 2020

## pHの影響 (初期の析出、24°C)



## 温度の影響 (初期の析出)



丸山一平・栗原諒・佐伯直彦：セメント系材料の炭酸化反応機構、コンクリート工学、61巻9号、pp.760-768、2023年

# 通常コンクリートとの品質・性能の差異

---

## ■人工炭酸カルシウム微粉末混和材の利用

- 流動性の低下
- 発熱量の増加

## ■ポルトランドセメント(クリンカー)量の削減

- 中性化速度の増大→鉄筋の腐食リスクの増大
- 普通鉄筋(炭素鋼)以外の補強筋(ステンレス鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、FRPなど)の利用
- 非腐食環境での利用

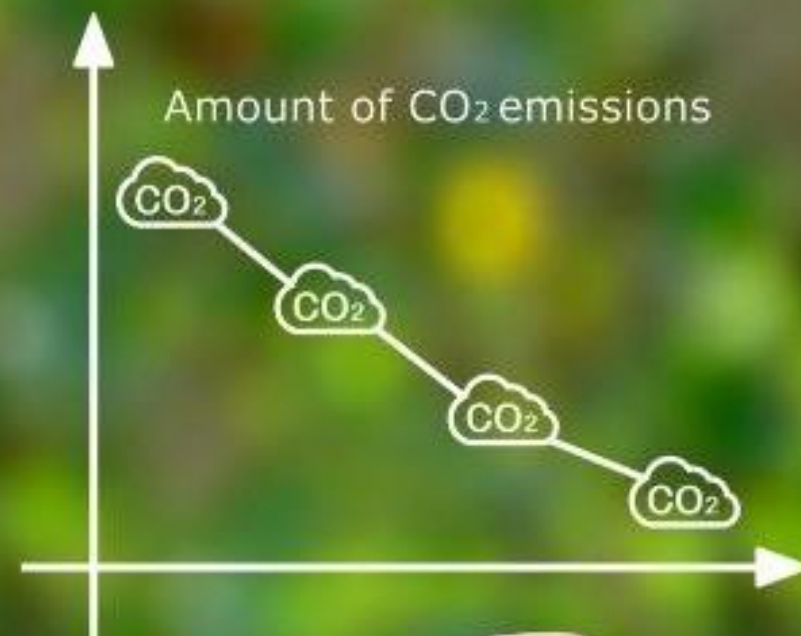
## ■乾燥収縮の増加

## ■クリープの増加

➡ 設計・施工方法の確認・確立、基準・指針類の整備

# 環境配慮型コンクリートの利用における課題

## 制度的課題

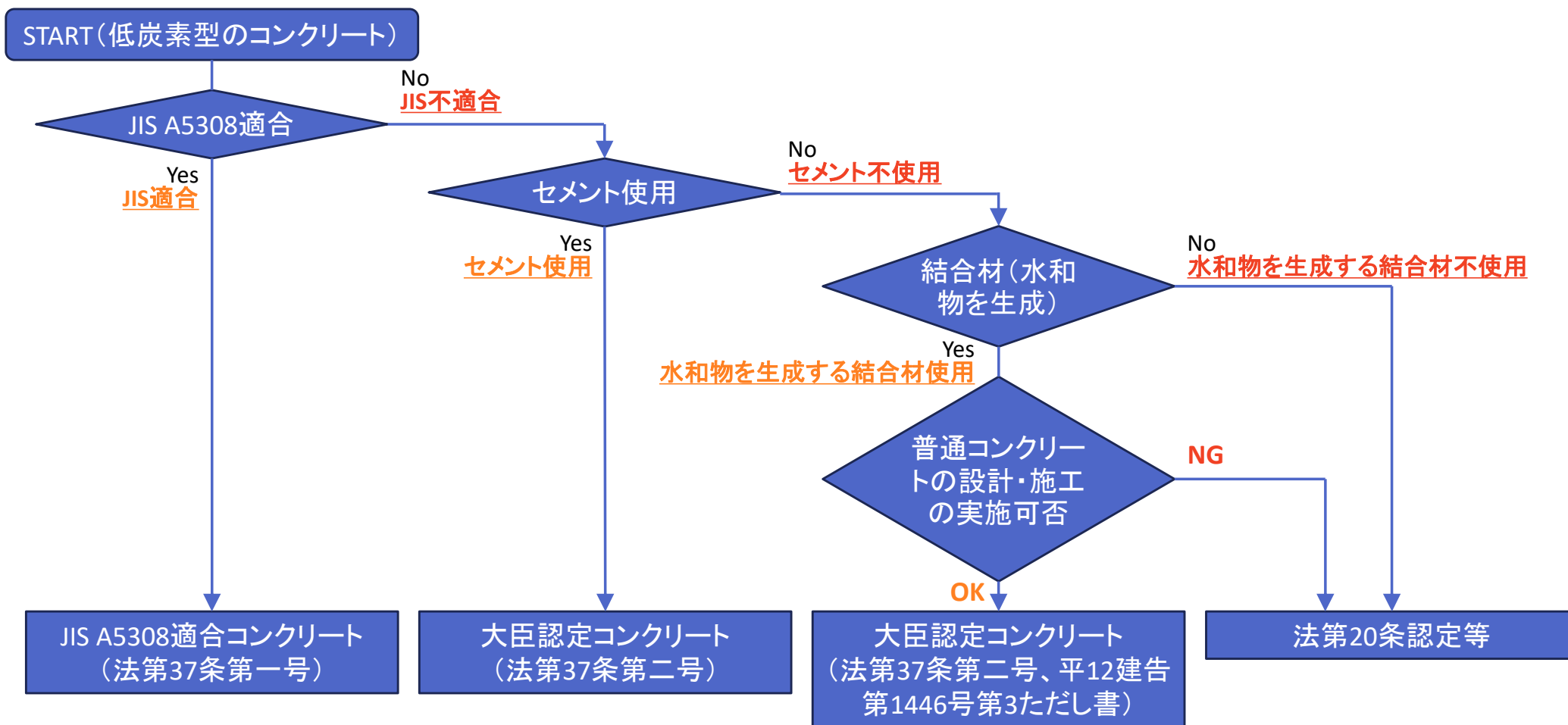


# 建築基準法第37条における位置づけ

- 建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である政令で定める部分に使用する木材、鋼材、コンクリートその他の建築材料として国土交通大臣が定めるもの(以下この条において「**指定建築材料**」という。)は、次の各号のいずれかに該当するものでなければならない。
  - 1 その品質が、指定建築材料ごとに**国土交通大臣の指定する日本産業規格又は日本農林規格に適合するもの**
  - 2 前号に掲げるもののほか、指定建築材料ごとに国土交通大臣が定める安全上、防火上又は衛生上必要な品質に関する技術的基準に適合するものであることについて**国土交通大臣の認定**を受けたもの

指定建築材料	JIS・JASの例
構造用鋼材及び鋳鋼	JIS A5525(鋼管ぐい)、JIS G3101(一般構造用圧延鋼材)、JIS G3136(建築構造用圧延鋼材)、JIS G3350(一般構造用軽量形鋼)、JIS G3352(デッキプレート)、JIS G3475(建築構造用炭素鋼管)など
鉄筋	JIS G3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)、JIS G3117(鉄筋コンクリート用再生棒鋼)
コンクリート	<b>JIS A5308(レディーミクストコンクリート)</b>
コンクリートブロック	JIS A5406(建築用コンクリートブロック)
木質接着成形軸材料	単板積層材のJASに規定する構造用単板積層材の規格
セラミックメーソンリーユニット	JIS A5210(建築用セラミックメーソンリーユニット)
緊張材	JIS G3536(PC鋼線及びPC鋼より線)、JIS G3109(PC鋼棒)、JIS G3137(細径異形PC鋼棒)
直交集成板	直交集成板のJASに規定する直交集成板の規格

# 建築基準法に基づく制度的分類



# コンクリートの品質・性能

## ■生コンクリート (JIS A 5308)

### □ JIS A 5308

「普通 21 12 20 N」+



RHG 30% / RW2(2.5%) / FAI 10%

### リサイクル材

使用材料名	記号	使用材料名	記号
エコセメント	E(又はEC)	回収骨材	RAG又はRAS
高炉スラグ骨材	BFG又はBFS	フライアッシュ	FAI又はFAII
フェロニッケルスラグ骨材	FNG又はFNS	高炉スラグ微粉末	BF
銅スラグ骨材	CUS	シリカフェーム	SF
電気炉酸化スラグ骨材	EFG又はEFS	上澄み水	RW1
再生骨材H	RHG又はRHS	スラッジ水	RW2

### □ ISO 22965

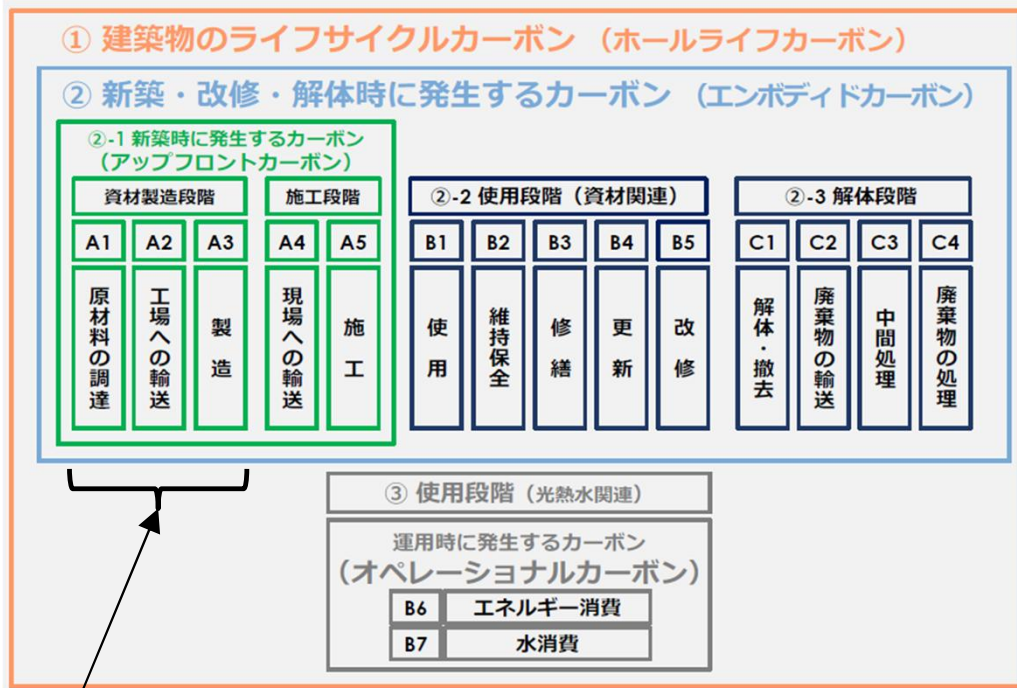
- ◆ 強度
- ◆ 単位容積質量
- ◆ コンシステンシー(スランプ)
- ◆ 耐凍害性
- ◆ コンクリート温度
- ◆ 強度発現性
- ◆ 水密性
- ◆ すり減り抵抗性など

### □ JASS 5 : 2009

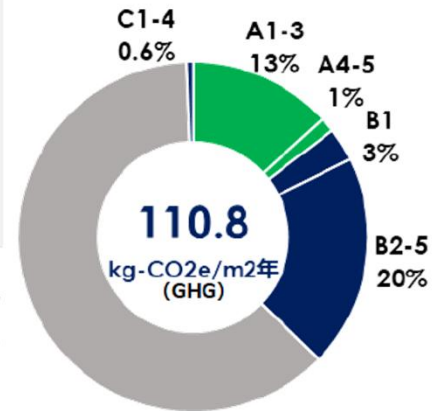
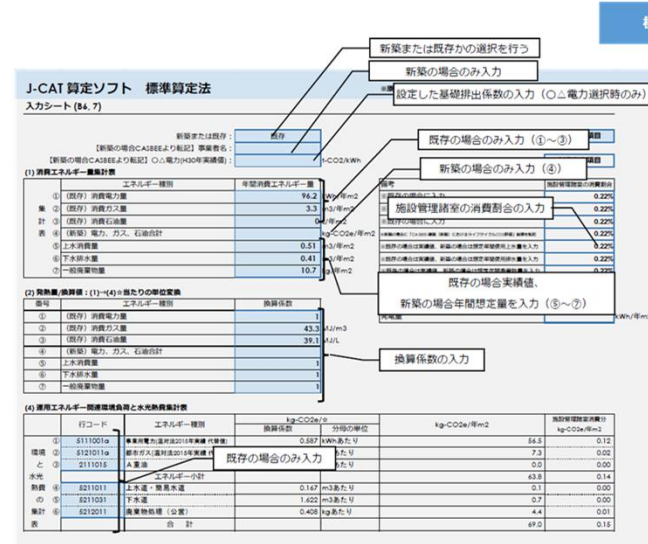
- ◆ 設計基準強度
- ◆ 耐久設計基準強度(中性化抵抗性、遮塩性)
- ◆ 耐凍害性
- ◆ 気乾単位容積質量
- ◆ スランプ・スランプフロー
- ◆ ヤング係数
- ◆ 乾燥収縮率

# 構造物レベルでの評価

## J-CATによる建築物のライフサイクルカーボンの算定



J-CAT: Japan Carbon Assessment Tool for Building Lifecycle



コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量原単位: **ベースライン** (日本建築学会「建物のLCA指針」の値、産業連関表ベース) **CFP・EPDの値**

# ベースライン(CO<sub>2</sub>排出量原単位)

---

## ■産業連関分析法

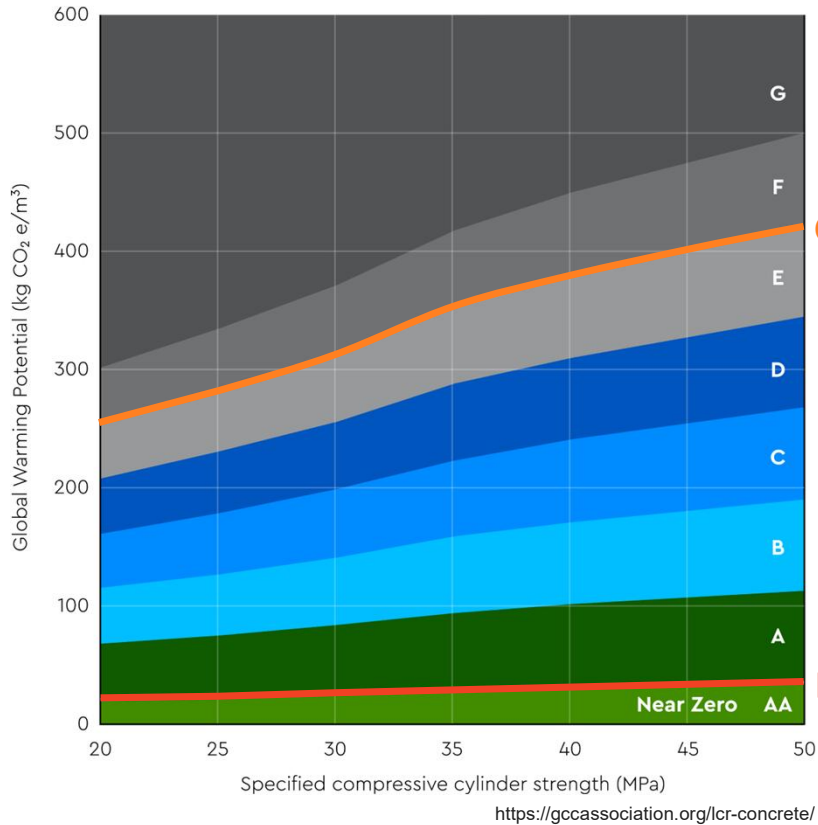
- 日本全体の環境負荷を各産業、製品に割り振る形式
- 建材・設備の製造工程以外のCO<sub>2</sub>排出量データ含む
- 建材・設備ごとのばらつきが少ない
- 製品種類ごとの代表値
- 個別製品の努力が反映できない
- データベース(例): AIJ-LCA(日本建築学会)、3EID(国立環境研究所)

## ■積上法

- 建材・設備の製造工程を中心に事業者自らがデータを収集して計算
- 個別製品の努力を反映できる
- データベース(例): AIST-IDEA(産業技術総合研究所)

# GCCAによる低炭素・脱炭素コンクリートの評価基準

gcca Global Low Carbon Ratings for Concrete (GCCA)



ベースライン



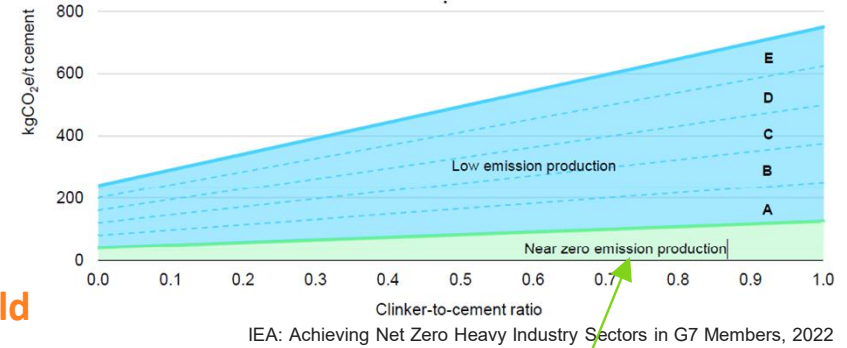
Global Reference Threshold

## CO<sub>2</sub>排出量削減方策

- セメント中のクリンカ含有量 → 0.52
- セメントのカーボンフットプリント → IEAのNear Zero
- 単位セメント量 → 14%減少  
(混和剤の進歩、56日圧縮強度への移行、性能試験の実施)
- その他の材料、輸送、製造工程のカーボンフットプリント → ゼロ

Near Zero Emission Product Threshold

コンクリートは自然炭酸化により一定量のCO<sub>2</sub>を吸収固定  
→コンクリートのベースライン(CO<sub>2</sub>排出量原単位)から控除



# EPD・CFPとは？

## ■ EPD (Environmental Product Declaration) : 環境製品宣言

- ISO 14025, ISO 21930, ISO 13315-8に準拠
- 製品が何でできていて、ライフサイクル全体で環境にどのような影響を与えるかを伝える、透明で客観的な報告書
- 科学的根拠に基づく定量的な製品の環境情報
  - ◆ 地球温暖化物質の排出量
  - ◆ オゾン層破壊物質の排出量
  - ◆ 光化学オキシダント物質の排出量
  - ◆ 富栄養化物質の排出量
  - ◆ 資源消費量

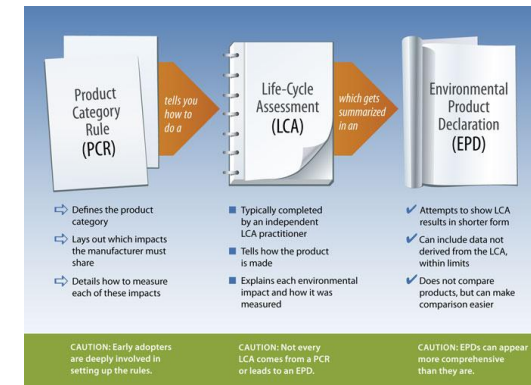
## ■ CFP (Carbon Footprint of Product) : 製品のカーボンフットプリント

- ISO 14067に準拠
- 製品のライフサイクル全体を通して排出される地球温暖化物質の排出量をCO<sub>2</sub>に換算して表示したもの
- 同一の算定ルールに基づいて算定されていない場合がある(機能単位が同一でない、算定対象のバウンダリーが異なる、使用している1次データが異なる)→EPDと同じ体系とすべき

→製品共通の算定ルール(PCR: Product Category Rule)に従って算定

→第三者機関による検証

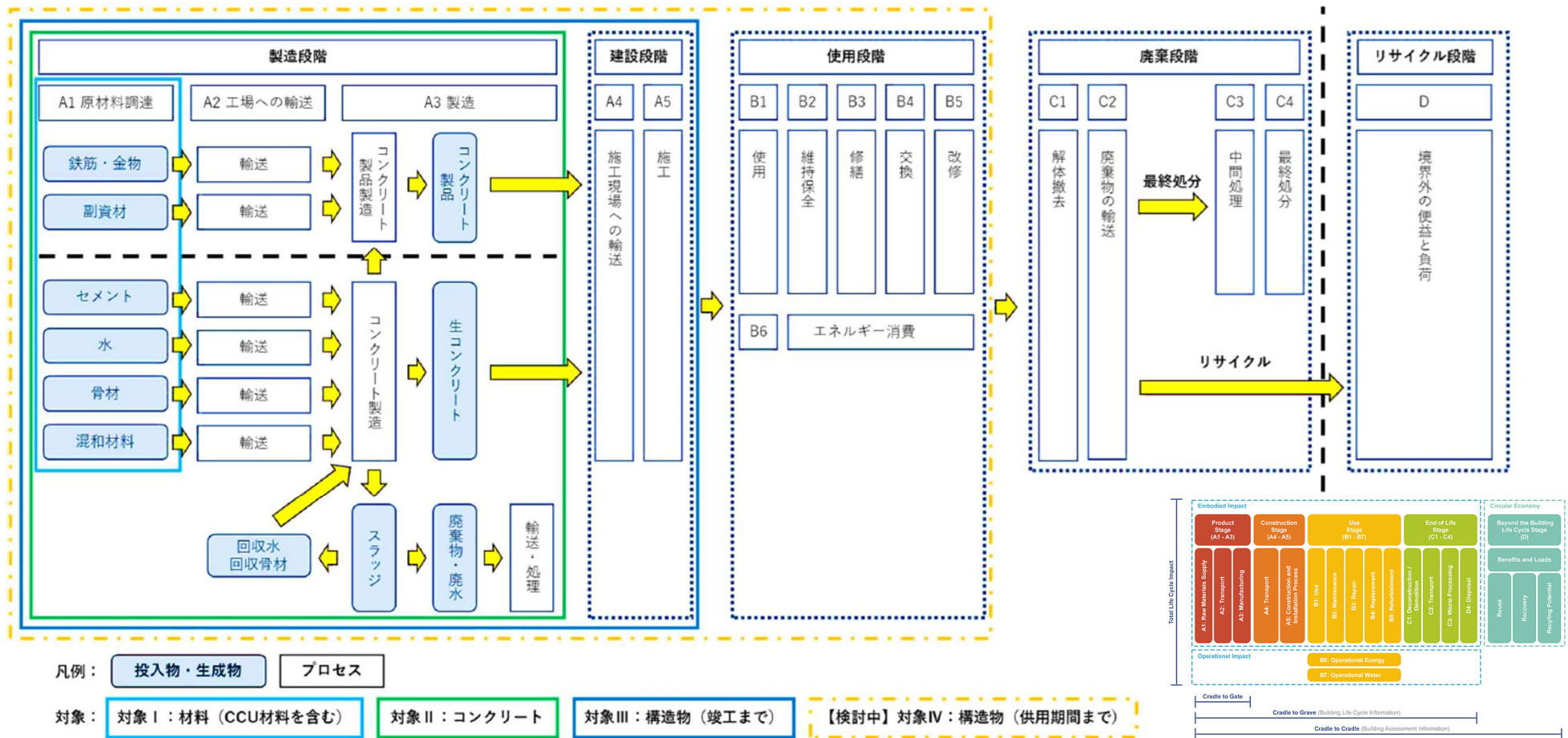
→製品の環境情報を公開



### 基本方針

- ① 正確性・比較可能性
- ② 参加容易性
- ③ 客観性
- ④ 国際性
- ⑤ 発展性・拡張性

# RRCSによるCFPルール の策定



[https://rrcs-association.or.jp/\\_userdata/cfp\\_1.pdf](https://rrcs-association.or.jp/_userdata/cfp_1.pdf)

# EPDの一例(プレキャストコンクリート製品)

## Environmental Performance

**Table 59** - Cradle-to-gate (A1-A3) per tonne

REPRESENTATIVE PRODUCT		HPA-80091055	HHY-80091096	HNN-80091065	HHY-80091053
GROUP DESCRIPTION		RISER/SUMP BASE - HPA	RISER - ONE PIECE - HHY	RISER BASE - HNN	RISER/SUMP BASE - HHY
GROUP #		GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3	GROUP 4
INDICATORS, ABBR.	UNITS				
EN15804+A2 CORE ENVIRONMENTAL IMPACT INDICATORS, MODULES A1-A3, PER TONNE OF PRECAST					
GWP-TOTAL	kg CO <sub>2</sub> -eq.	149	178	220	200
GWP-FOSSIL	kg CO <sub>2</sub> -eq.	148	177	218	200
GWP-BIOGENIC	kg CO <sub>2</sub> -eq.	0.263	0.613	2.62	0.620
GWP-LULUC	kg CO <sub>2</sub> -eq.	0.0302	0.0381	0.0417	0.0426
ODP	kg CFC11-eq.	2.16E-10	2.71E-10	3.18E-10	2.70E-10
AP	Mole of H <sup>+</sup> eq.	0.288	0.329	0.436	0.404
EP-FRESHWATER	kg P eq.	2.10E-04	2.38E-04	4.55E-04	2.45E-04
EP-MARINE	kg N eq.	0.0983	0.120	0.155	0.132
EP-TERRESTRIAL	Mole of N eq.	1.07	1.28	1.66	1.41
POCP	kg NMVOC eq.	0.271	0.327	0.425	0.368
ADP-M&M	kg Sb-eq.	6.02E-05	8.34E-05	2.50E-05	1.24E-04
ADP-FOSSIL	MJ	896	1,060	1,340	1,320
WDP	m <sup>3</sup> world equiv.	28.7	25.6	39.8	40.7

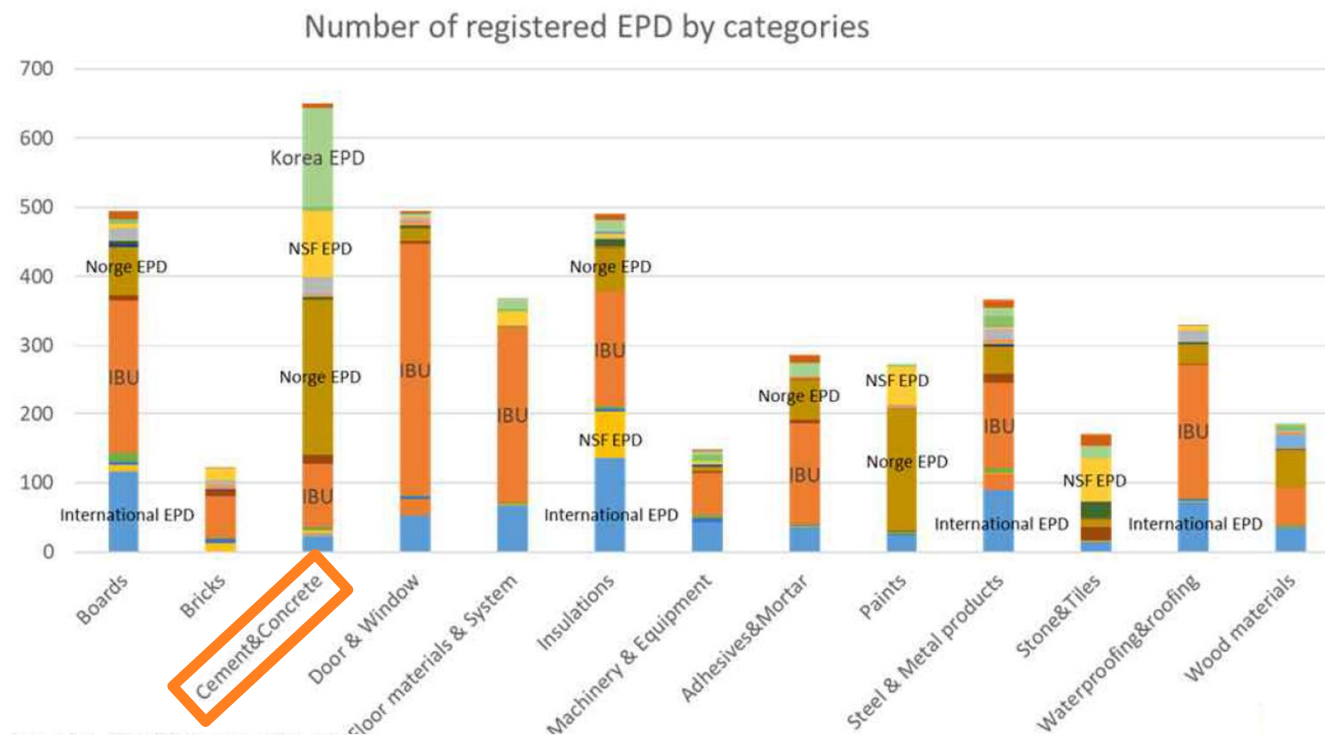
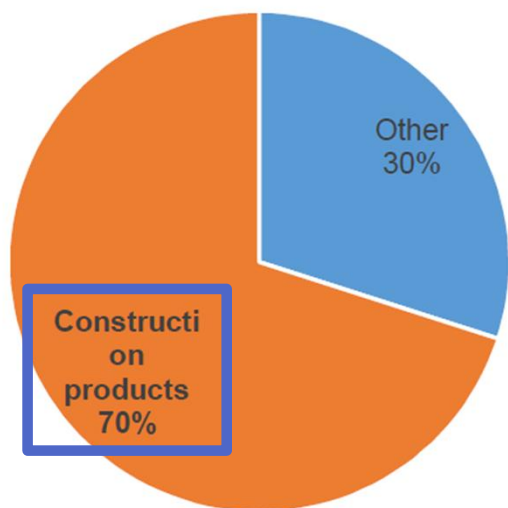
<https://www.humes.co.nz/assets/Humes-Precast-EPD-Version-1-v2.1.pdf>

# 建設分野の材料・製品の国際EPD登録状況

## International EPD

- ✓ All registered EPD : 1,256
- ✓ Building and construction products : 880

Registered International EPD



Source: Chang-U Chae, Sunghee Kim, IEA EBC Annex72, 2021

# 環境配慮型コンクリートの利用における課題

## 経済的課題



# 環境配慮型コンクリートの製造コスト・価格

## ■少量多品種

- スケールメリットなし
- GI基金スタート時:通常のプレキャストコンクリート製品の3倍

## ■コンクリートによるCO<sub>2</sub>の強制的固定化

- CO<sub>2</sub>の価格

## ■CO<sub>2</sub>の調達・削減コスト

- 排出量取引価格(2026年春本格稼働予定):1,700~4,300円/t-CO<sub>2</sub>
- 分離・回収コスト:3,900~4,100円/t-CO<sub>2</sub>(物理吸収法:3.9円/kg、化学吸収法:4.1円/kg)
- 炭素税(温暖化対策税):石油・天然ガス等に課税、約289円/t-CO<sub>2</sub>
- 限界削減費用(2030年想定):約14,000円~15,000円/t-CO<sub>2</sub>

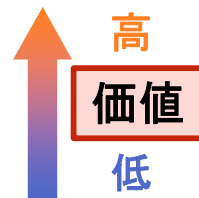
## ■J-クレジット

- 取引事例がない
- ベースラインは開発とともに低下

# 固定するCO<sub>2</sub>の起源による区別・価値

## ■地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>の区分

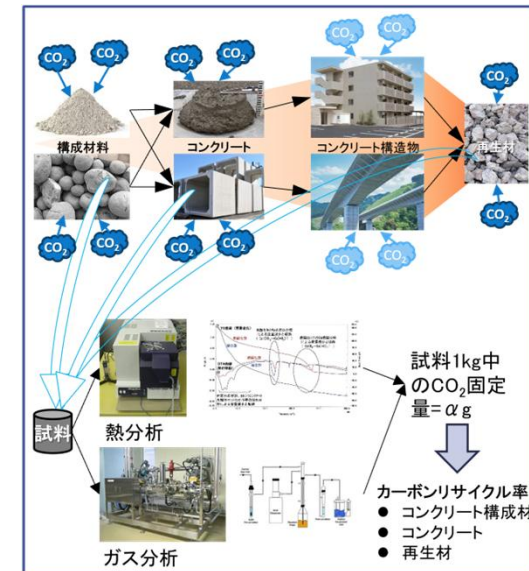
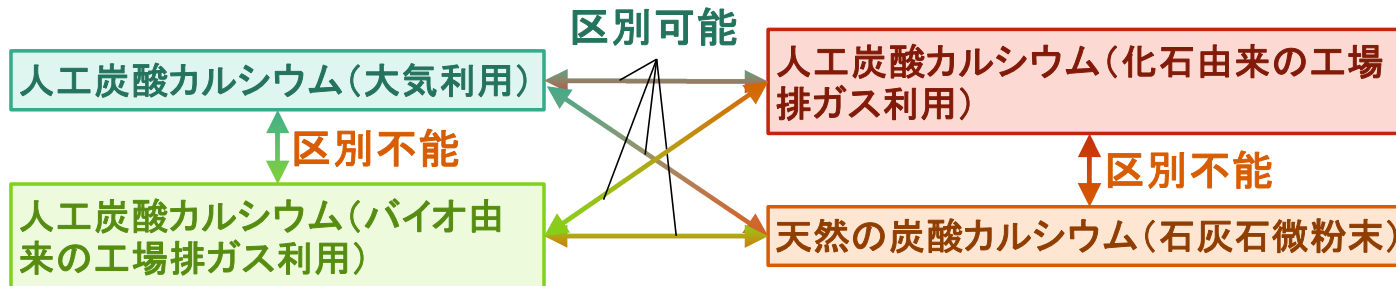
- 気温の低減(直接的)
- 気温の低減(間接的)
- 気温の上昇抑制



- ・・・DAC(Direct Air Capture)によるCO<sub>2</sub>
- ・・・バイオ起源排ガスから回収したCO<sub>2</sub>
- ・・・化石起源排ガスから回収したCO<sub>2</sub>

## ■固定したCO<sub>2</sub>の定量化

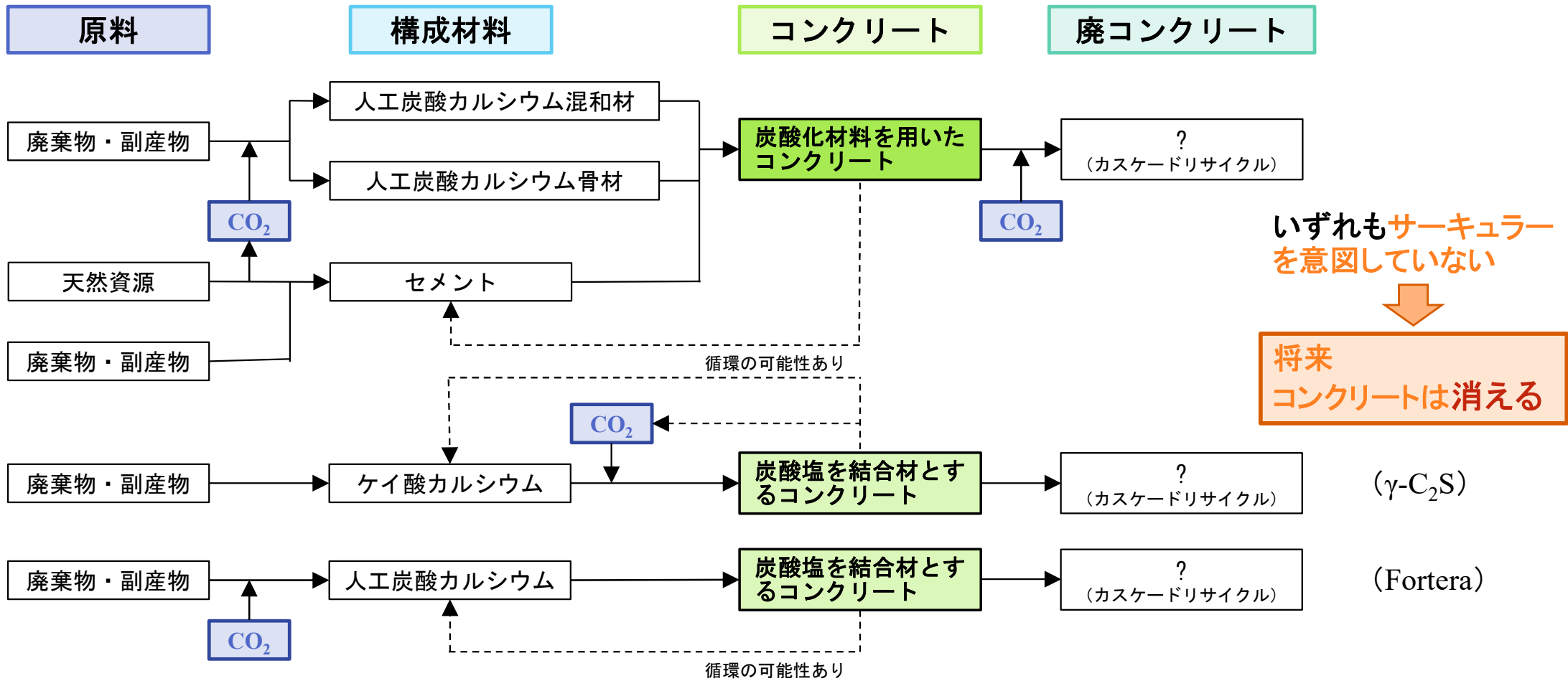
### □CO<sub>2</sub>の区別



# 環境配慮型コンクリートのありべき姿



# カーボンニュートラルコンクリートの資源循環性



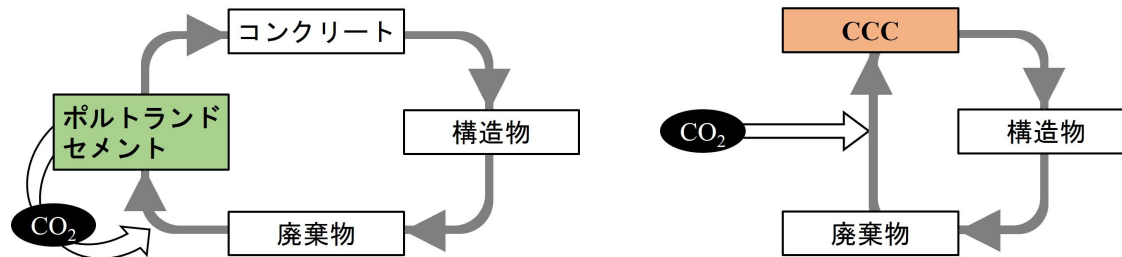
# 理想的な環境配慮型コンクリート

## ■カーボンニュートラル・サーキュラーエコノミーの実現

- 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...

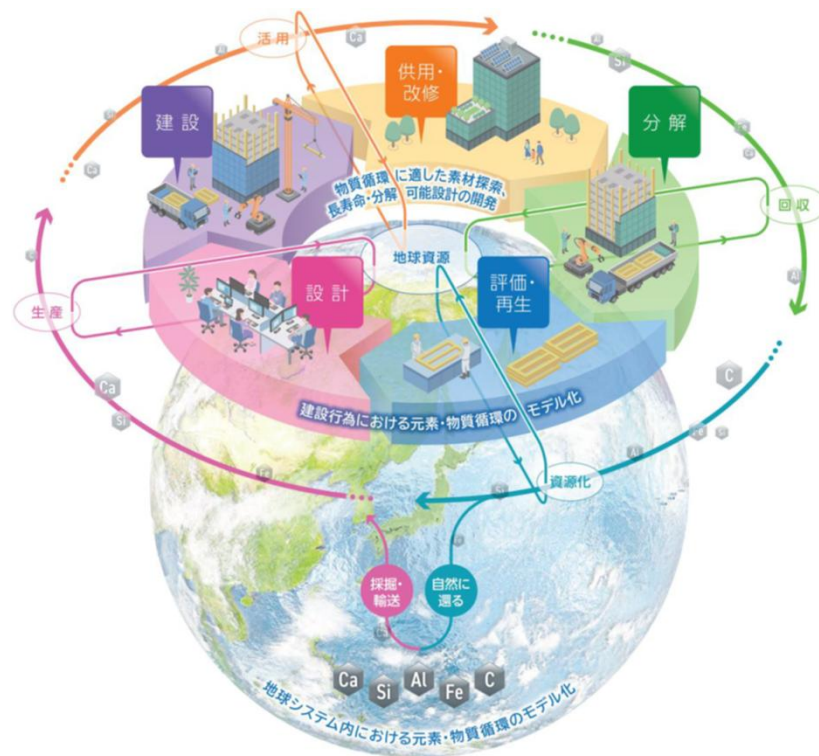
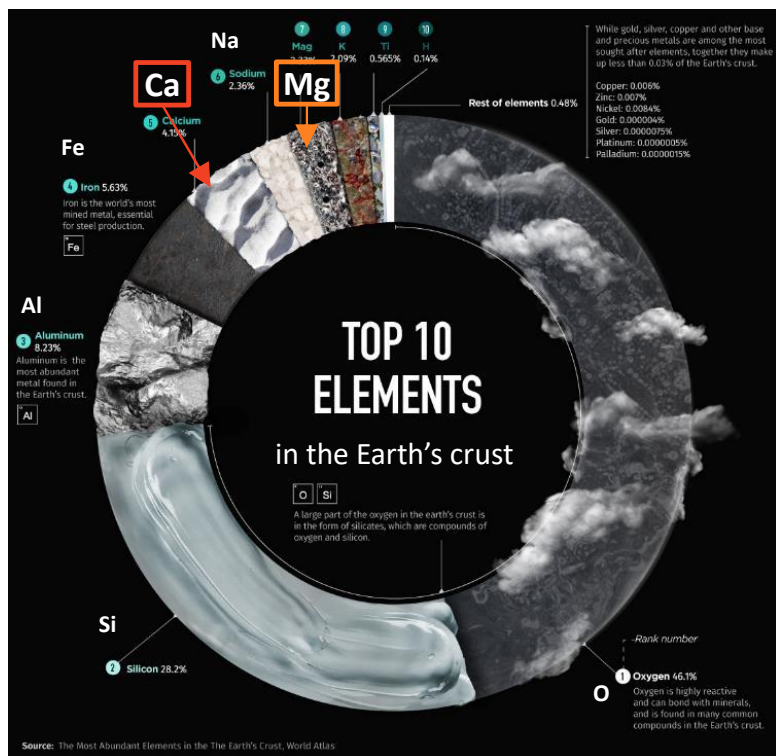


[https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/mokuri\\_kyoutei/attach/pdf/index-2.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/mokuri_kyoutei/attach/pdf/index-2.pdf)



# 建築材料の主要元素の循環

## 環境・経済に負担をかけない元素の最適な分配・循環





ご清聴、ありがとうございました。

救え、地球を！

ホワイトカーボンで！！

noguchi@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp