

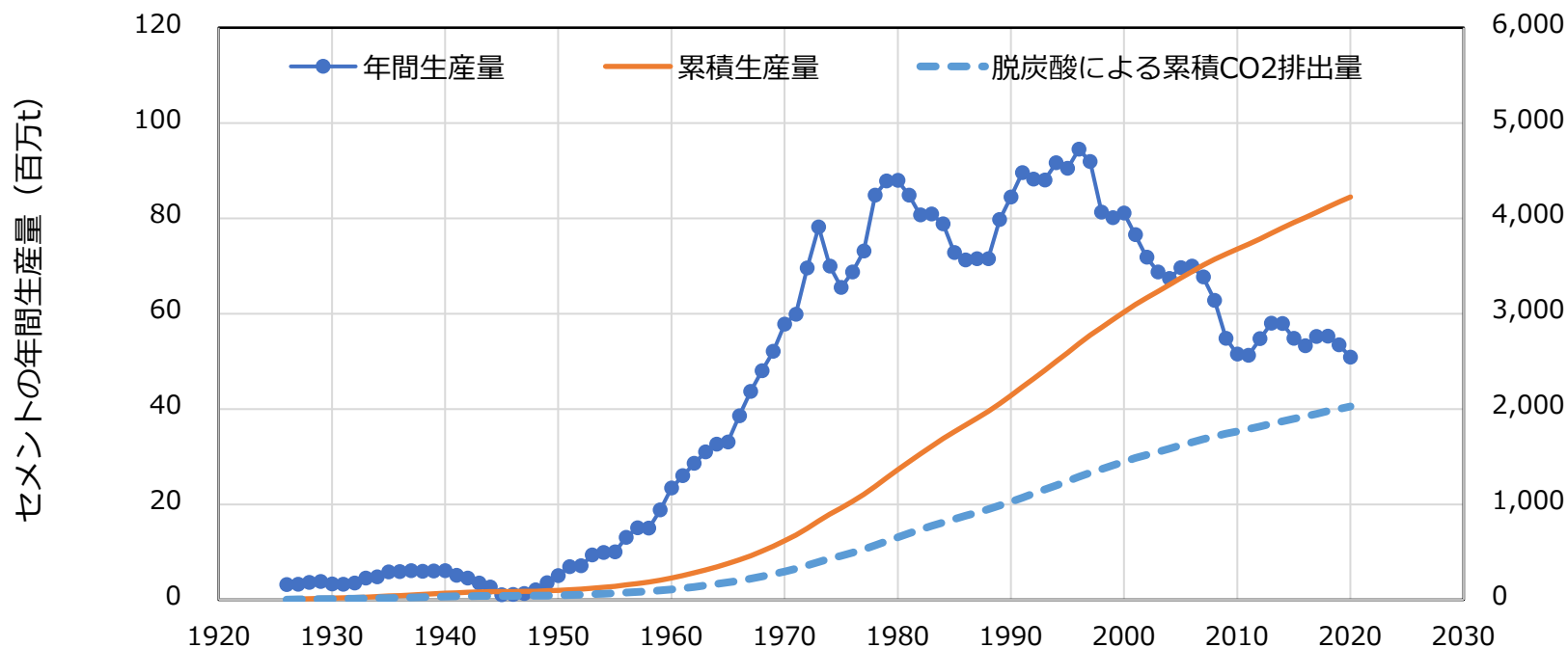
## C<sup>4</sup>S研究開発プロジェクト



PM：野口貴文  
東京大学 教授  
PJ参画機関：東京大学、北海道大学  
再委託先：東京理科大学  
工学院大学  
宇都宮大学  
清水建設  
太平洋セメント  
増尾リサイクル

# 社会的背景（セメント生産とCO<sub>2</sub>排出）、目的

## 日本



セメントの累積生産量およびセメント生産時の脱炭酸による累積CO<sub>2</sub>排出量 (百万t)

■ 大気中のCO<sub>2</sub>総量  
28,000億トン

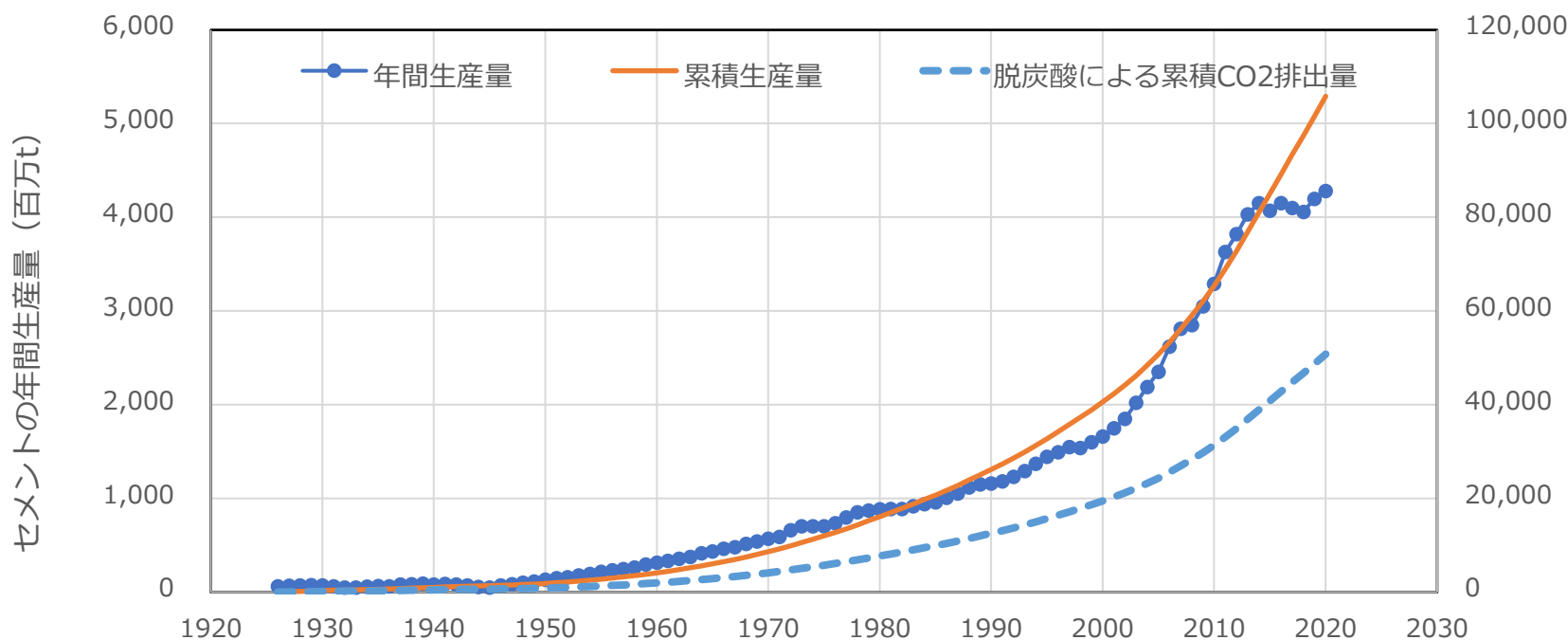
■ セメント生産時の脱炭酸によるCO<sub>2</sub>排出

▶ 累積量	
世界全体	550億トン
日本	20億トン

▶ 年間	
世界全体	21億トン
日本	2600万トン

コンクリートによる  
回収・利用 (CCUS)

## 世界全体



セメントの累積生産量およびセメント生産時の脱炭酸による累積CO<sub>2</sub>排出量 (百万t)

# 社会的背景、CCUSの方法



石灰岩 ( $\text{CaCO}_3$ ) を採取し、セメントなどを生産  
 → カルシウム ( $\text{Ca}$ ) を用いようとすると常に  $\text{CO}_2$  発生



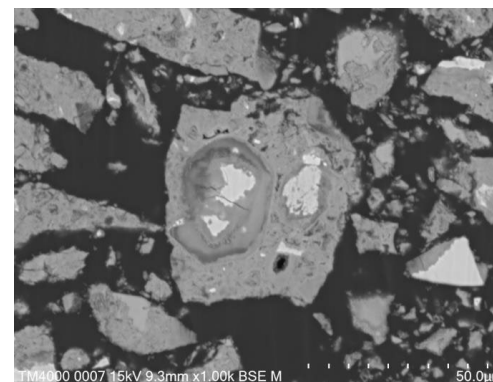
都市で利用されなくなった **コンクリート** は貴重なカルシウム ( $\text{Ca}$ ) 源



廃コンクリートを粉砕



空気中の  $\text{CO}_2$  を結合



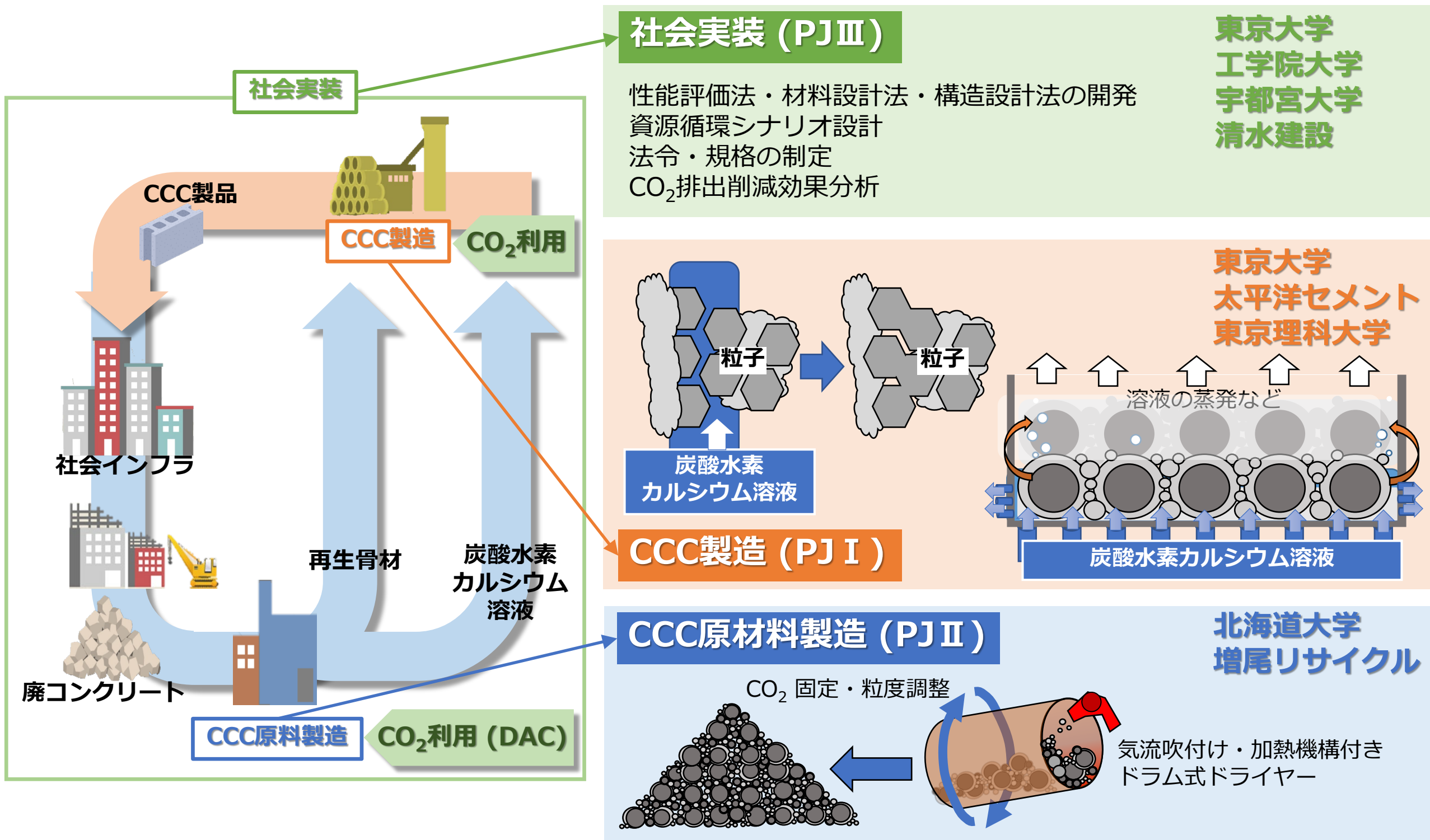
炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) 生成



CCC

→ **カルシウムカーボネートコンクリート (CCC)** を製造し、  
 **$\text{CO}_2$  を回収・固定**

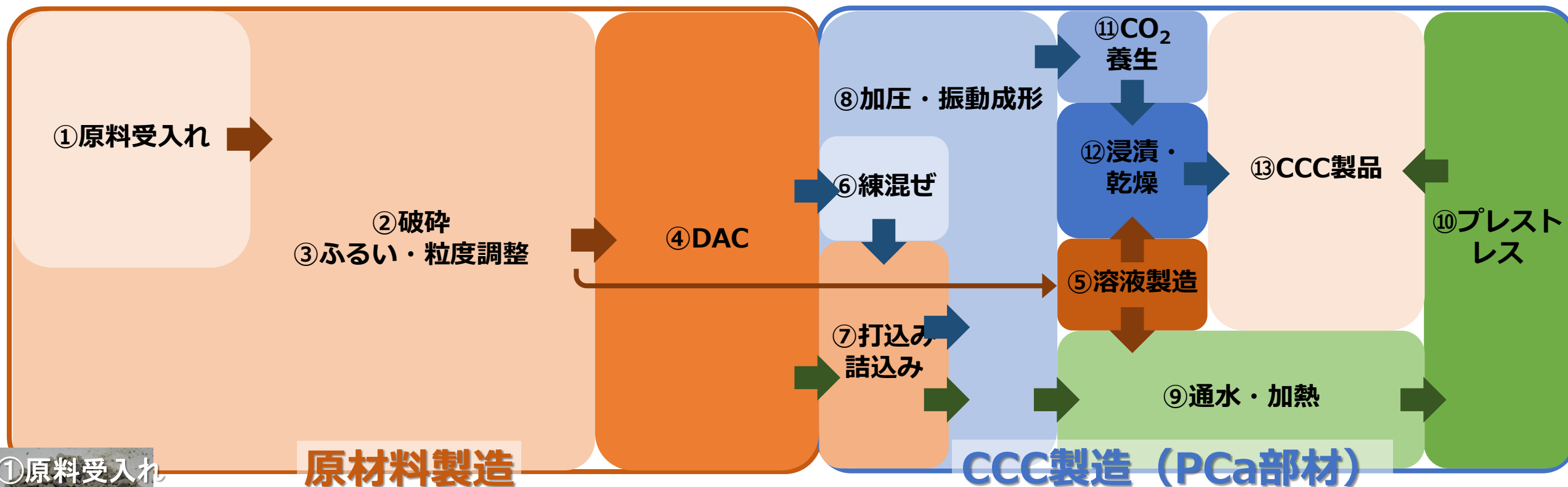
# プロジェクト実施体制



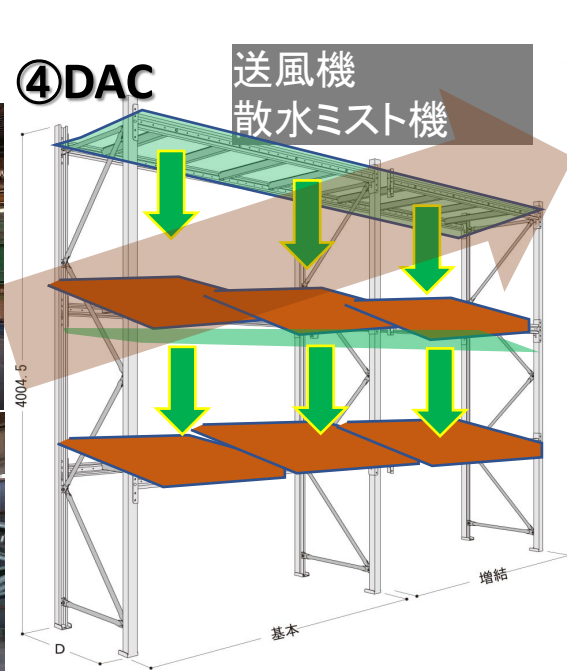
# 開発スケジュール、中間目標・最終目標

研究開発項目	2022年度末目標 (中間目標)	2024年度末目標 (中間目標)	2029年度末目標 (最終目標)
① CCC反応制御技術・部材製造原理の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>■Φ10×20cmの試験体で建築基準法最低強度12MPaを確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■強度12MPaを有する構造部材の製造</li> <li>■構造躯体の施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■パイロット実証における従来コンクリートと同等以上の強度確保</li> </ul>
② CCC原材料の製造プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>■社会実装可能な大気からのCO<sub>2</sub>吸収時間の見通し</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■500kg/時のCCC原材料製造能力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■2トン/時のCCC原材料製造プロセスの開発</li> </ul>
③ CCC構造物の構造設計法・性能評価法の開発およびC <sup>4</sup> Sの社会実装	<ul style="list-style-type: none"> <li>■LCA評価において地球温暖化対策への貢献の見通し</li> <li>■国土交通大臣認定制度の制定方策の立案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■材料設計法の概略の確立</li> <li>■構造部材設計原理の概略の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■2階建て建築物の建設</li> <li>■LCA評価による地球温暖化対策の有効性の確認</li> </ul>
④ CCC構造物設計・製造・施工技術の開発・実証研究		<ul style="list-style-type: none"> <li>■構造物の構法・工法の確定</li> <li>■施工機器の検討</li> <li>■試作設計・開発への着手</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■パイロット実証における適正な工期・役務量での施工実現の確認</li> </ul>

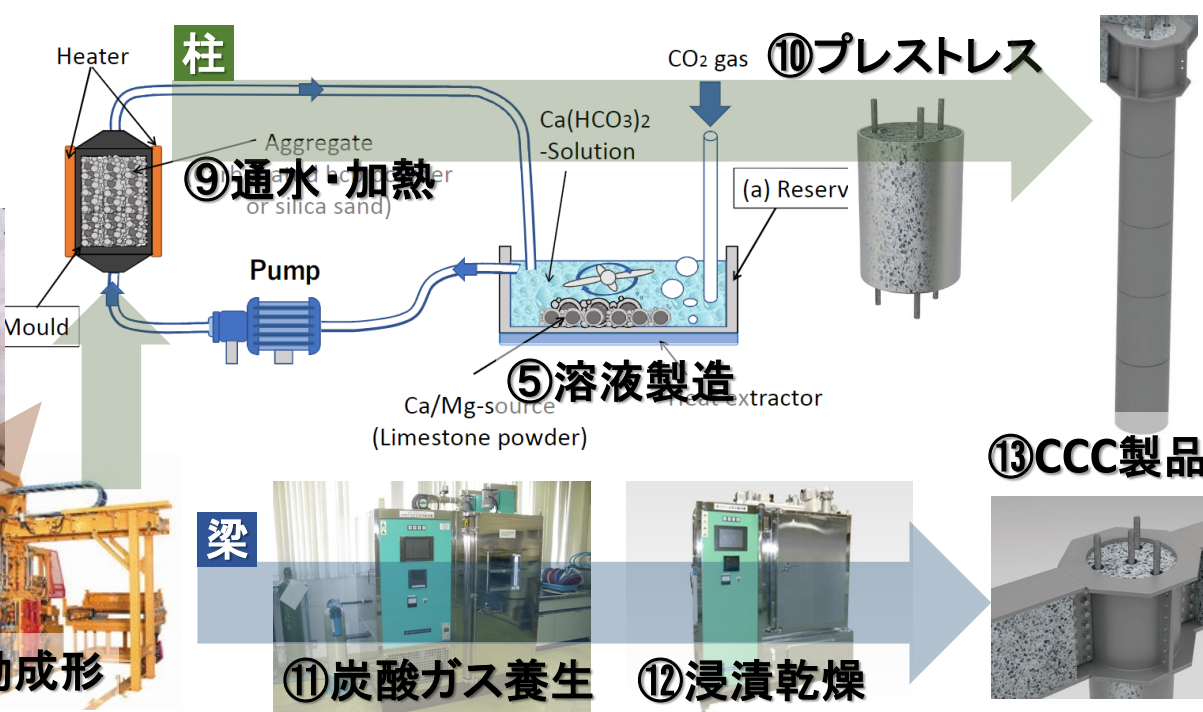
# 社会実装のイメージ（構造部材の製造・利用）



原材料製造



⑧振動成形

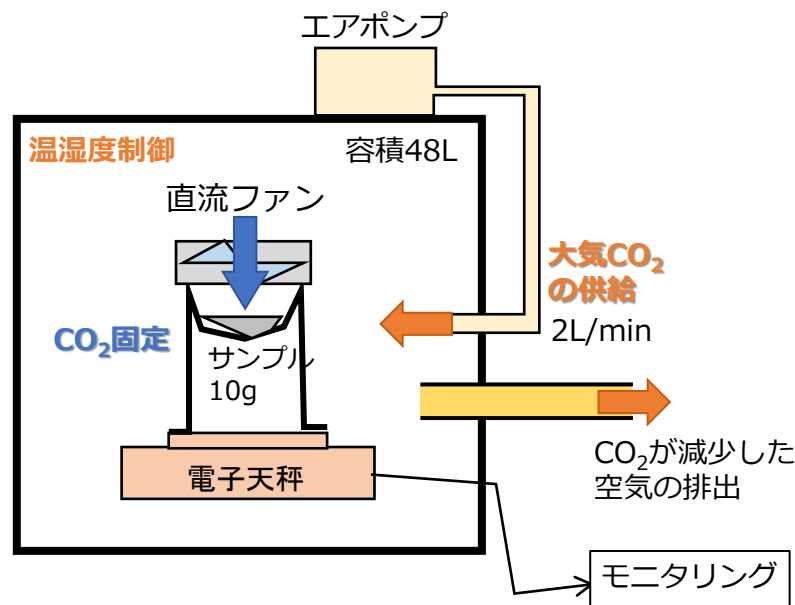


# プロジェクトII：CCC原材料の製造

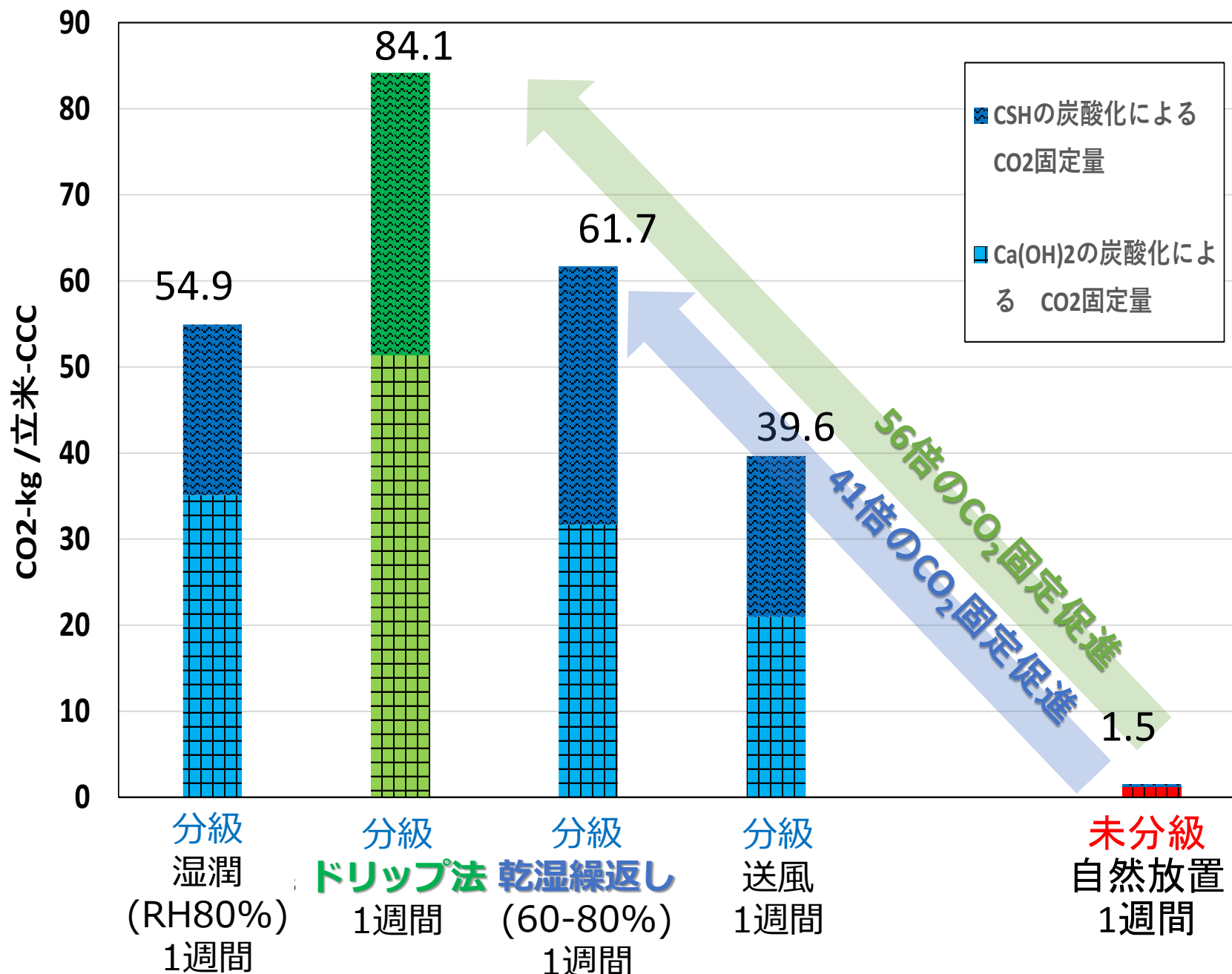


# DACによる廃コンクリートのCO<sub>2</sub>固定化促進

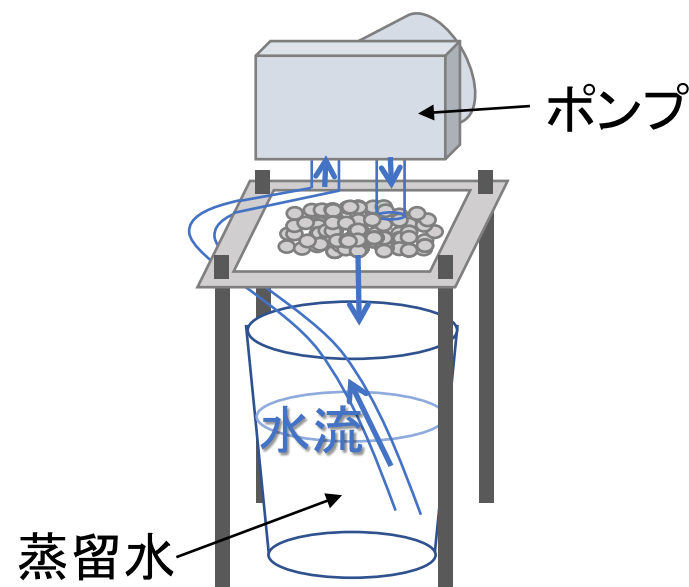
**温・湿度制御法**  
→CO<sub>2</sub>固定化促進



乾・湿繰返しによるCO<sub>2</sub>固定量の増大(大気CO<sub>2</sub>利用)



**ドリップ法 (乾・湿繰返し)**  
→C-S-Hの分解促進  
→CO<sub>2</sub>固定化促進

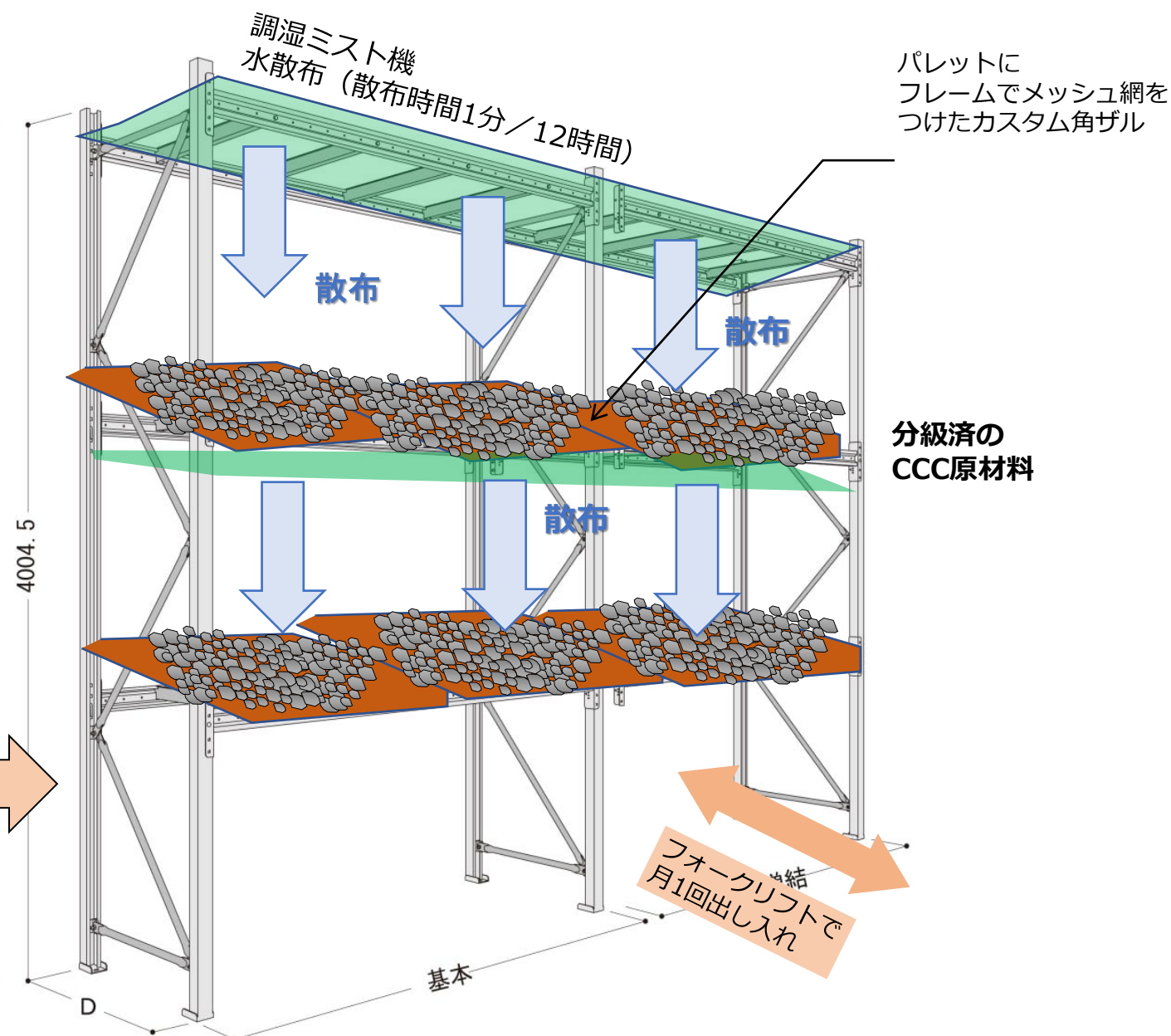
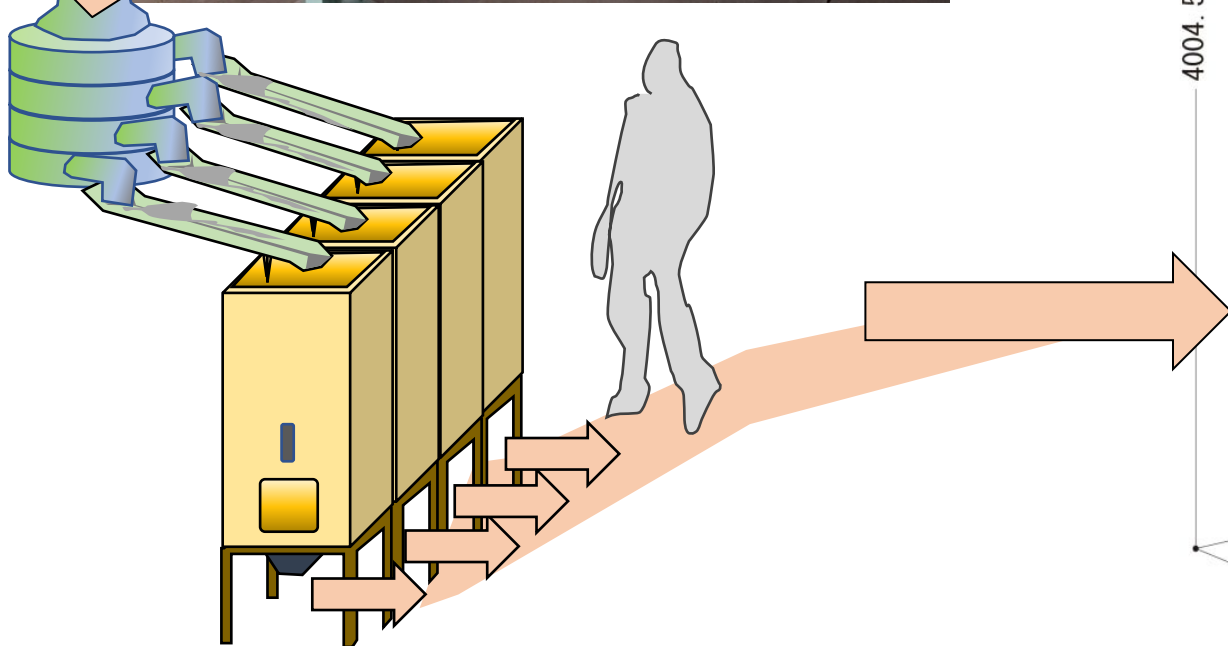




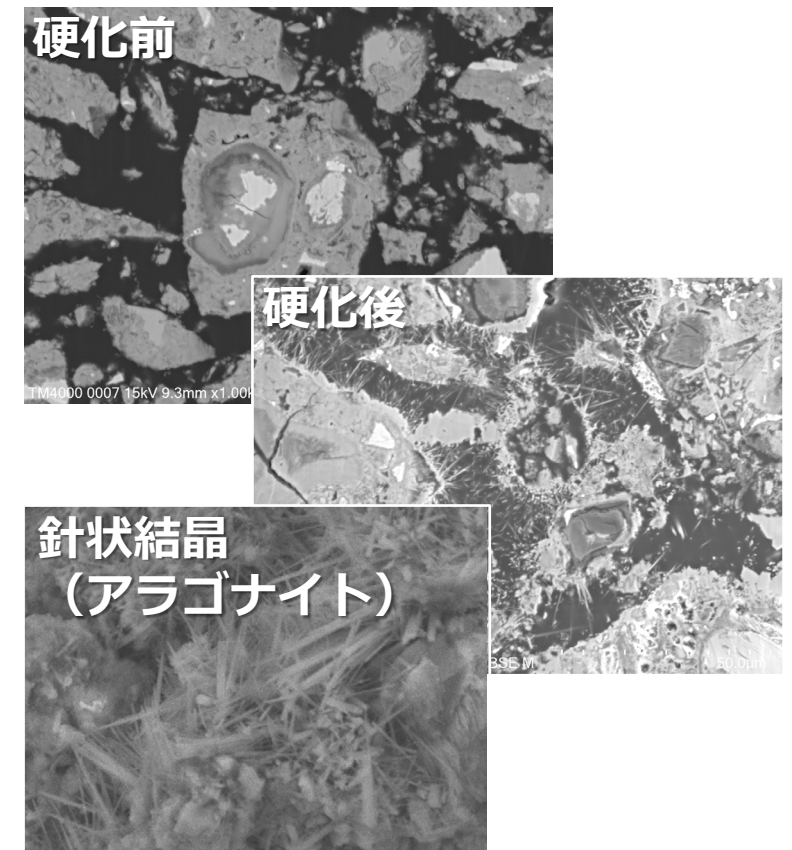
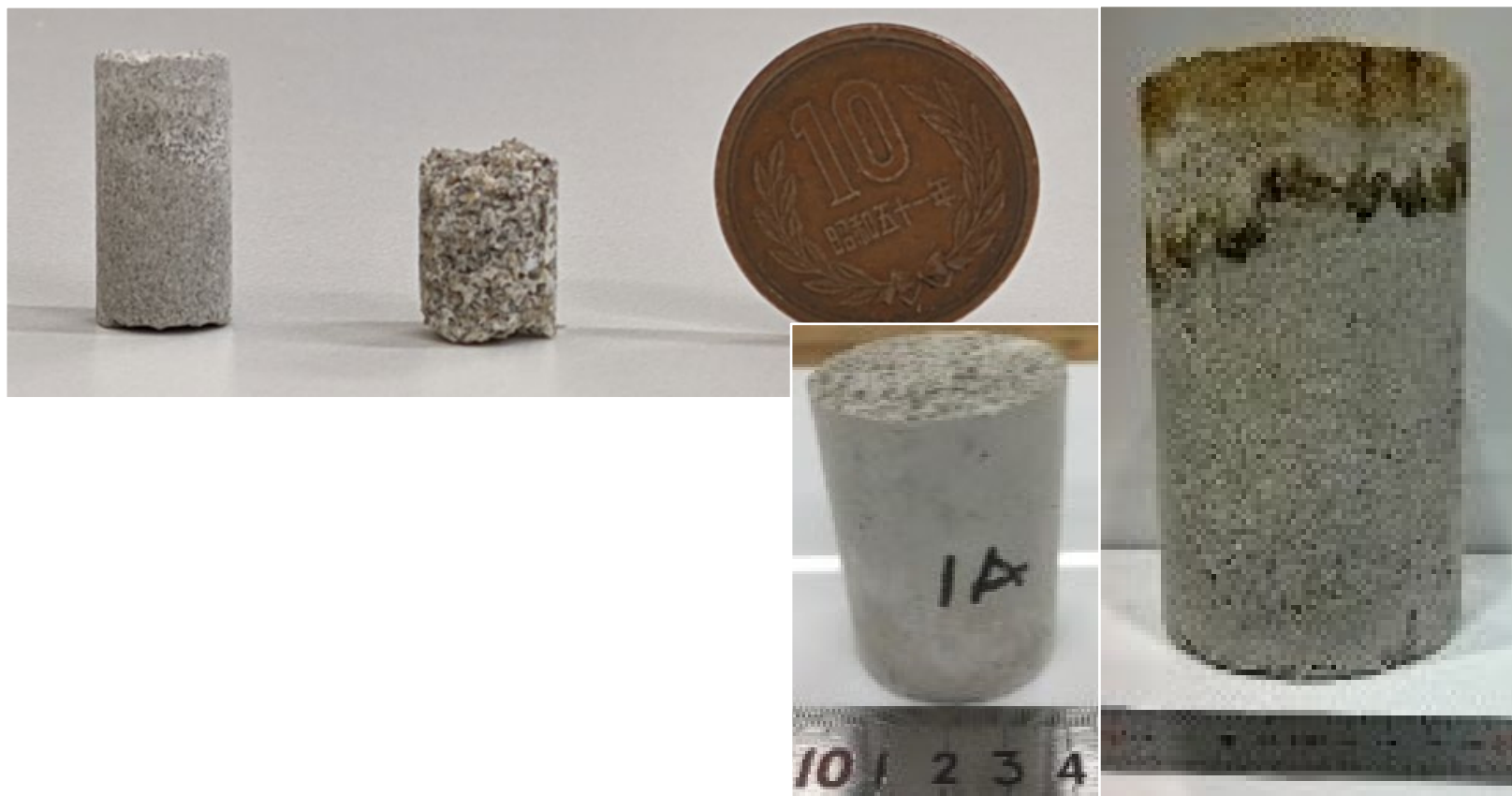
# CCC原材料製造（構想プラント）

主な工程：**破碎**、少量の**ミスト散布**（1回/12時間）のみ

➡ エネルギー消費量少ない ➡ **CO<sub>2</sub>排出量少ない**：10kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>程度



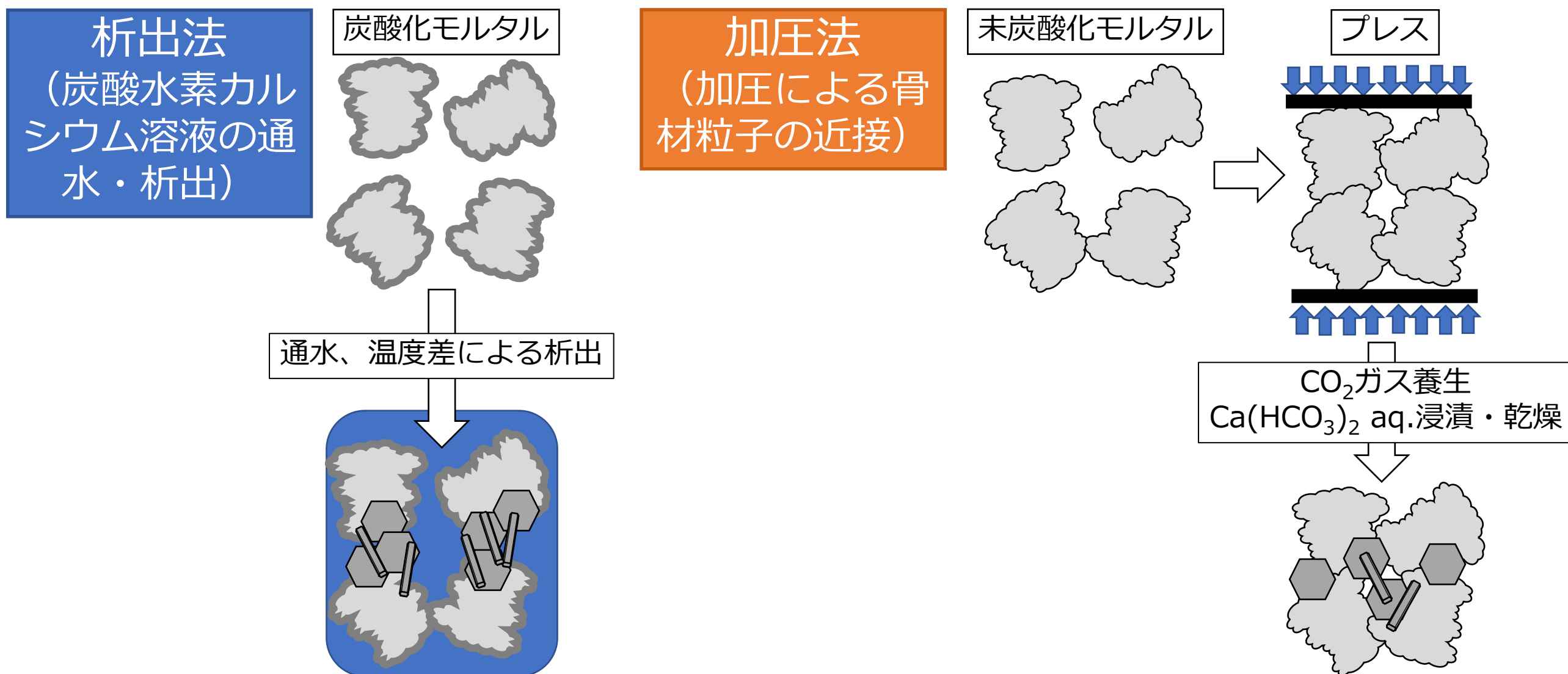
# プロジェクト I : CCCの製造



# カルシウムカーボネートコンクリートの製造原理

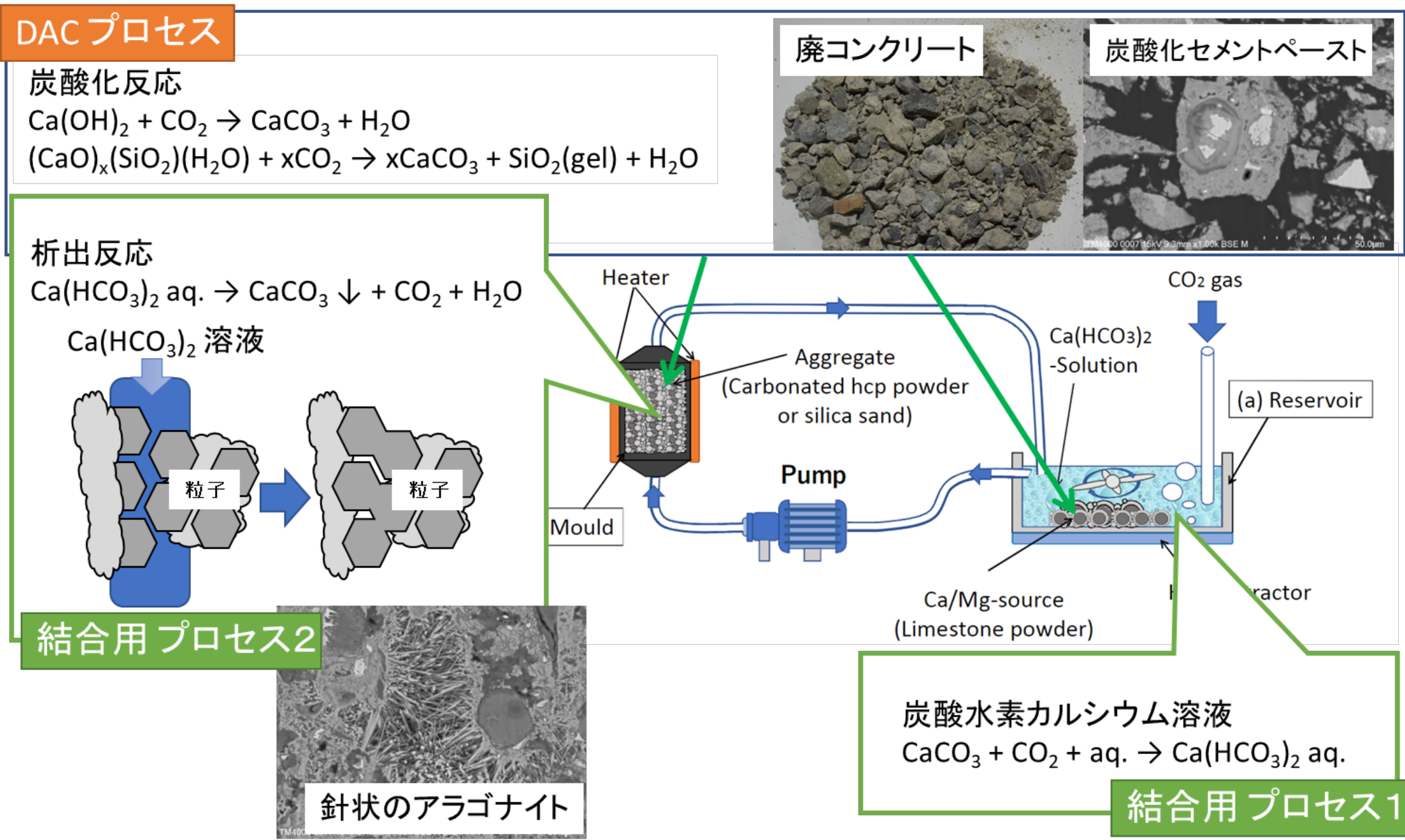
炭酸カルシウムコンクリート（CCC）の強度発現の方策

- ① 骨材粒子間に炭酸カルシウムを生成して応力伝達
- ② 初期の骨材粒子の適切な配置



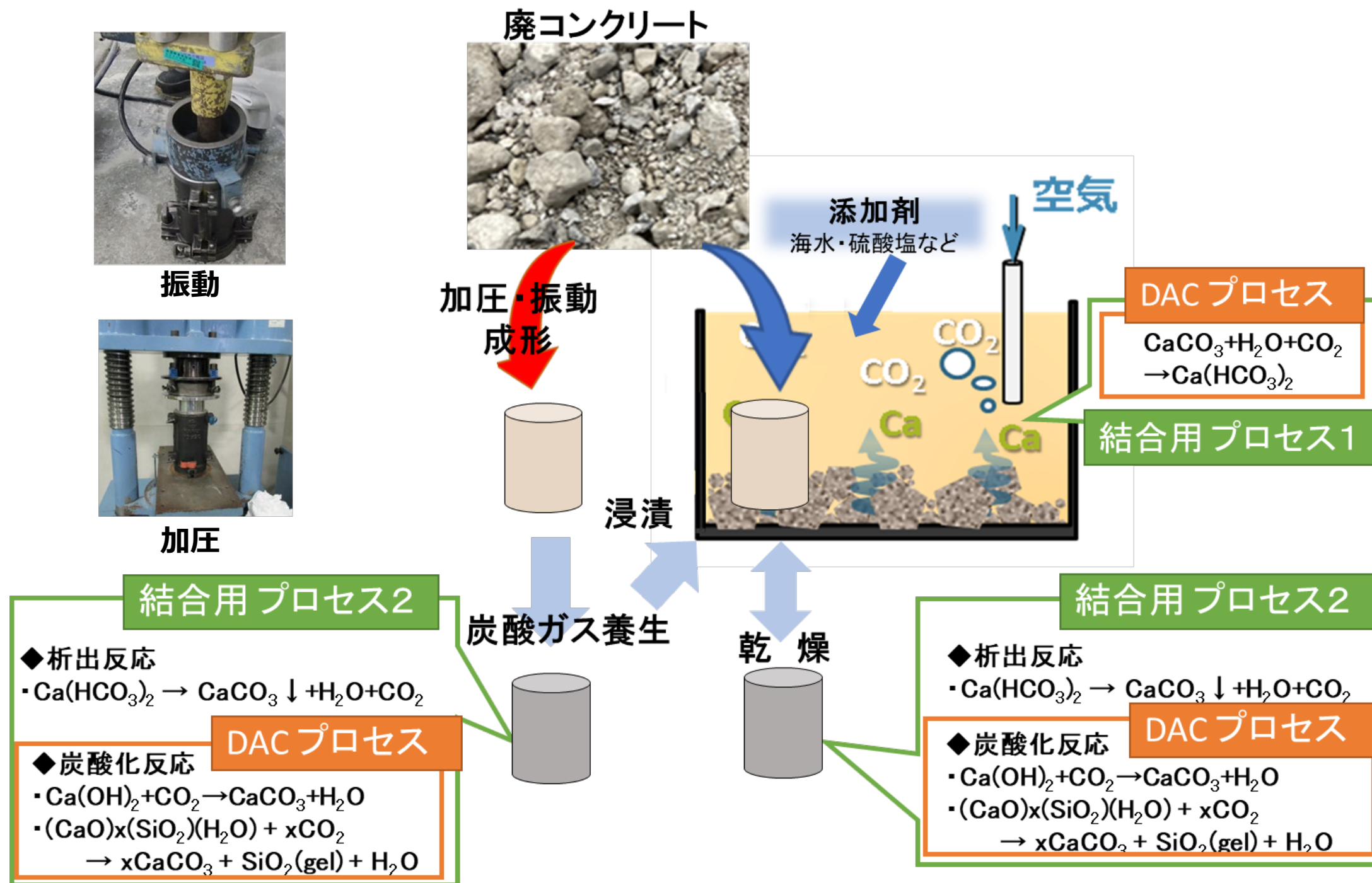
# 析出法

## 粒子充填、連続的な炭酸カルシウムの析出で製造（炭酸化率：85%）



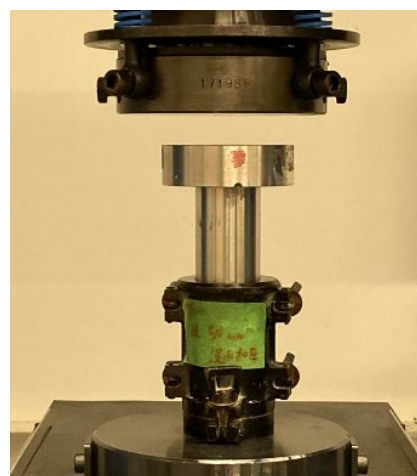
# 加圧法

加圧充填、浸漬・乾燥の繰返して製造（炭酸化率：60～70%）



# 積層法

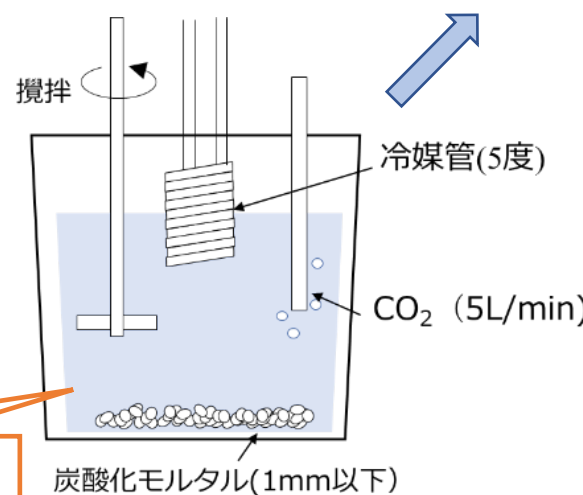
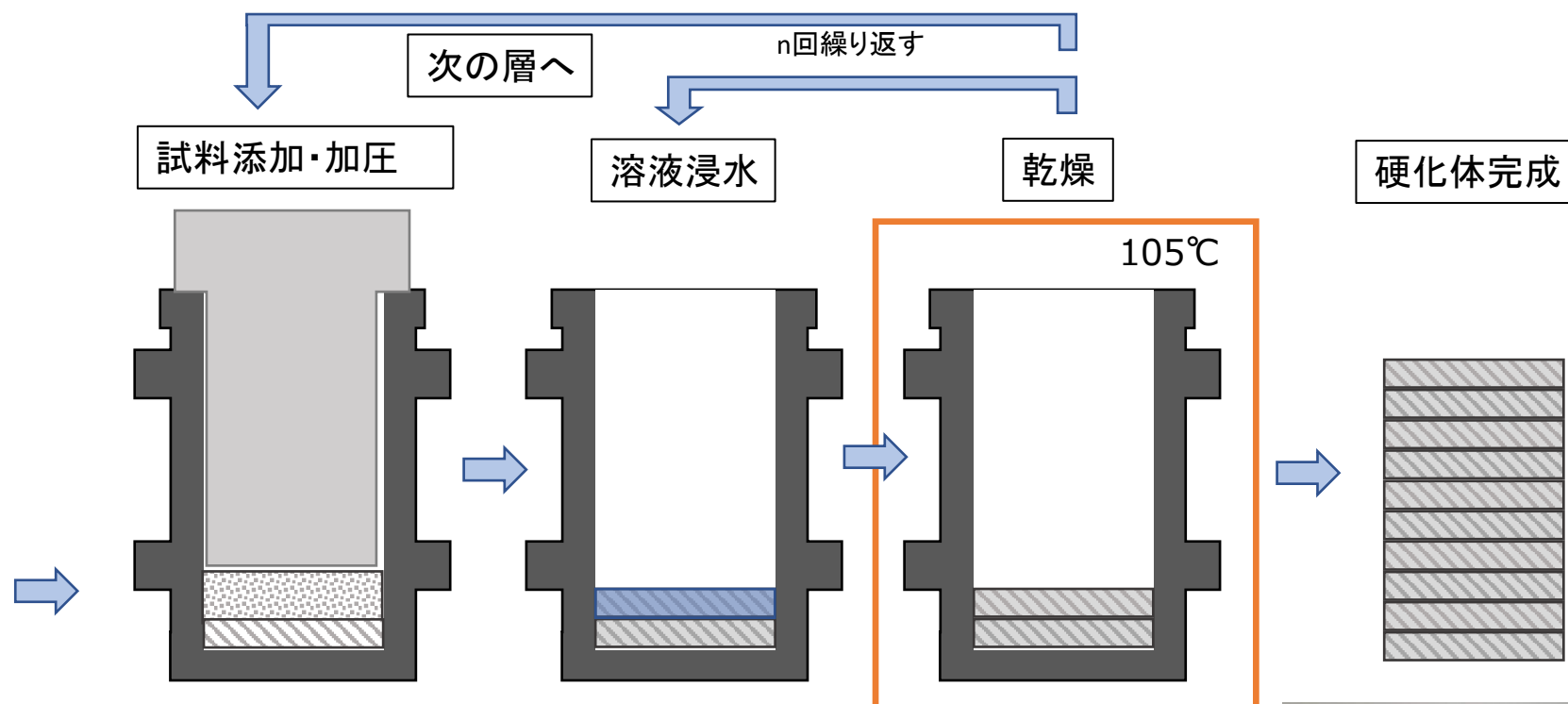
加圧充填・浸水・乾燥の繰返して製造（炭酸化率：60～70%）



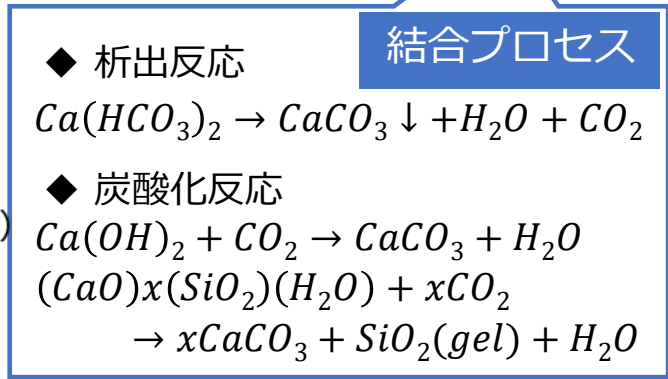
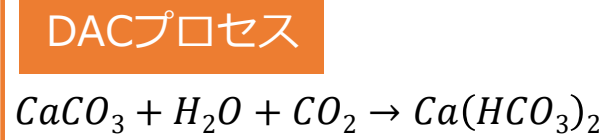
加圧成形(Φ5cm)



炭酸化モルタル



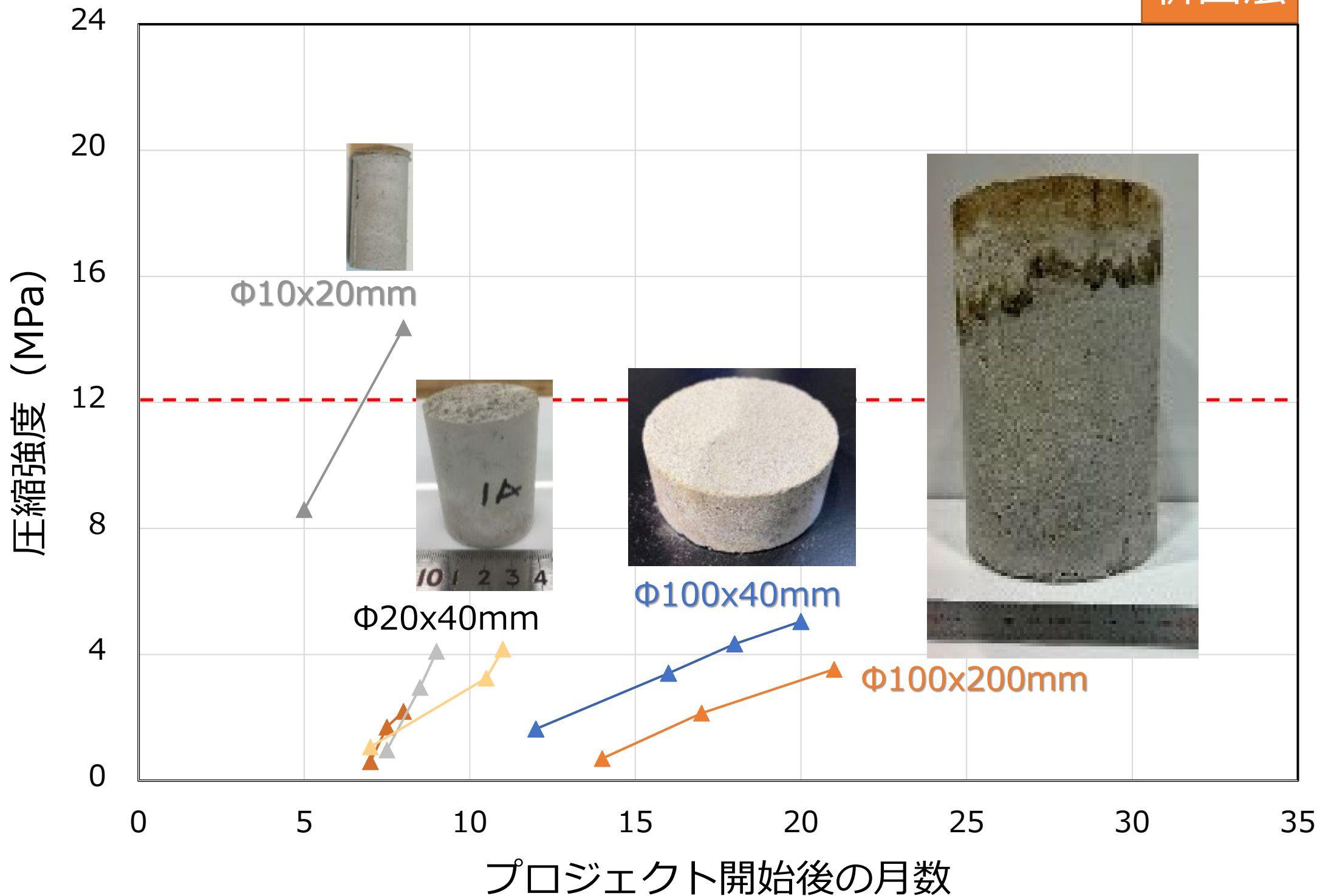
溶液製造



作製試験体

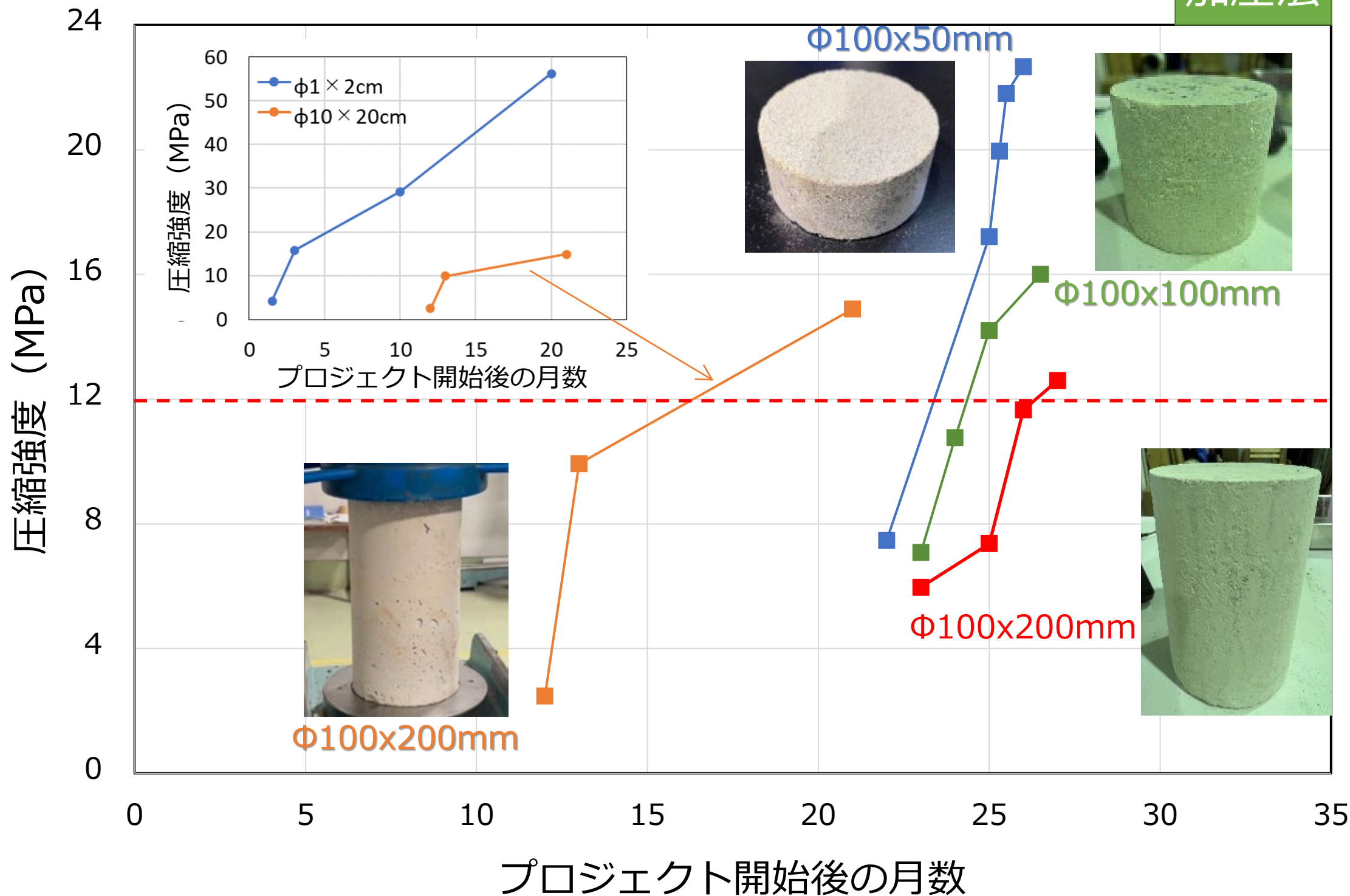
# 開発経過（強度増大、サイズ増大）

析出法



# 開発経過 (強度増大、サイズ増大)

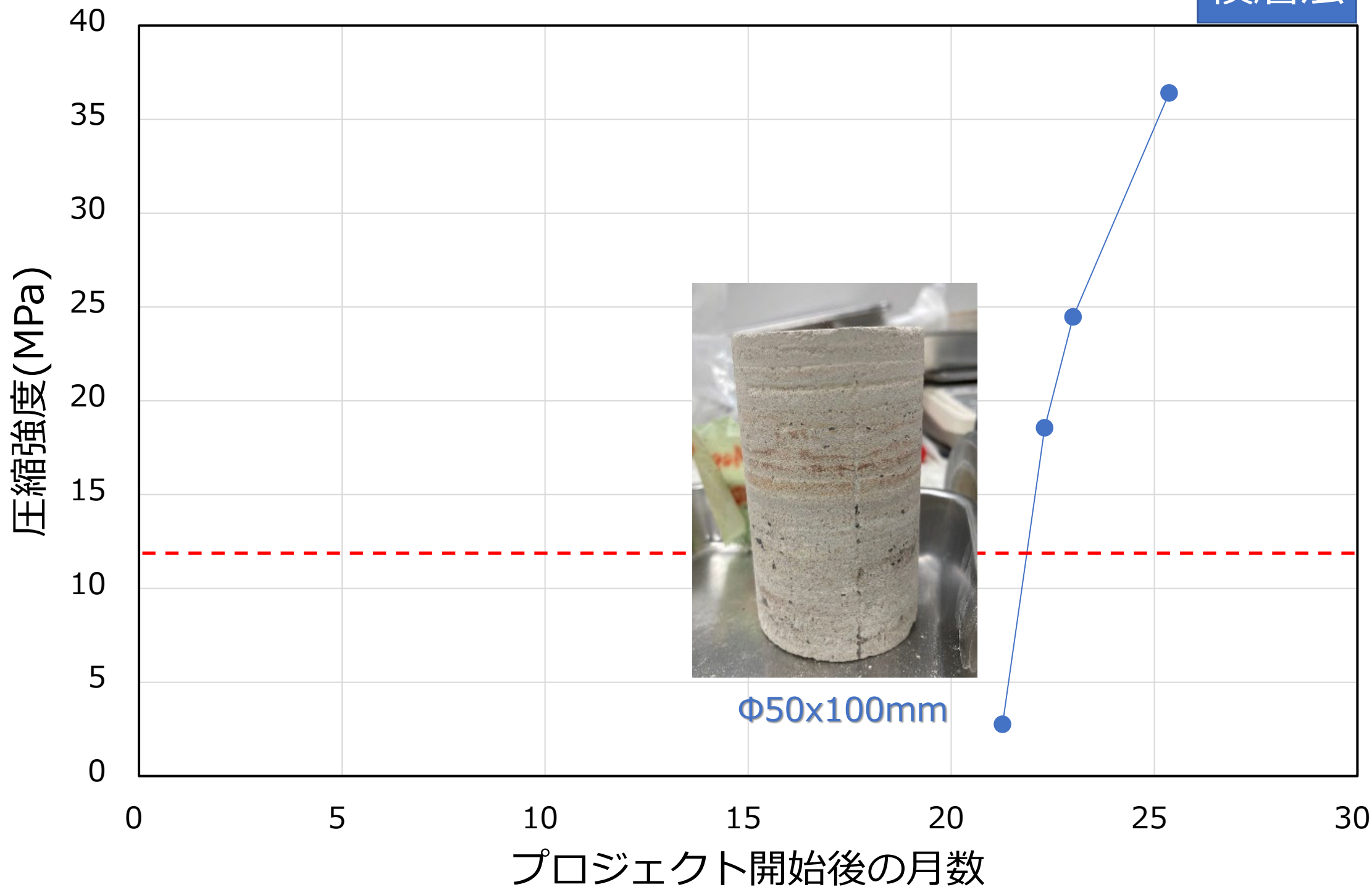
加圧法





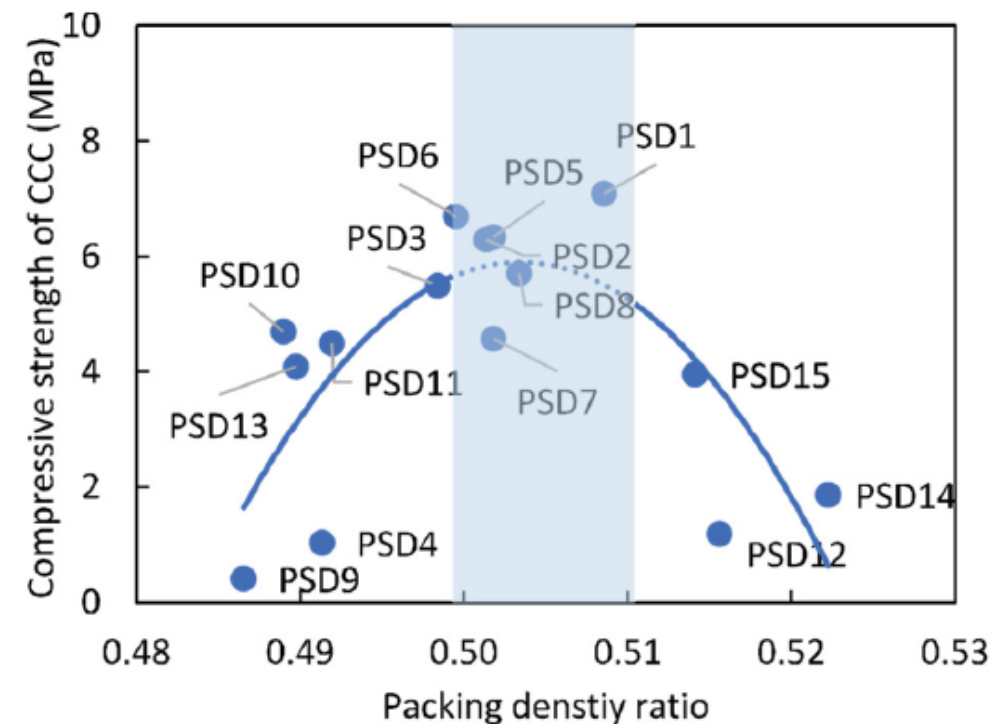
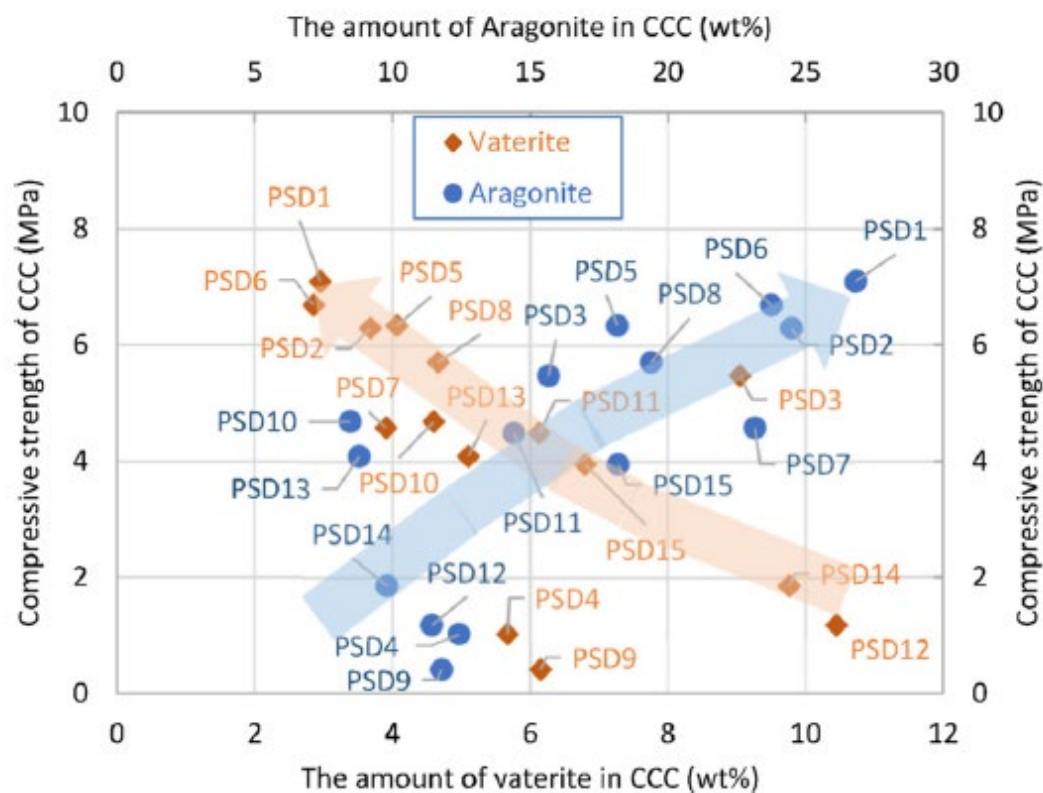
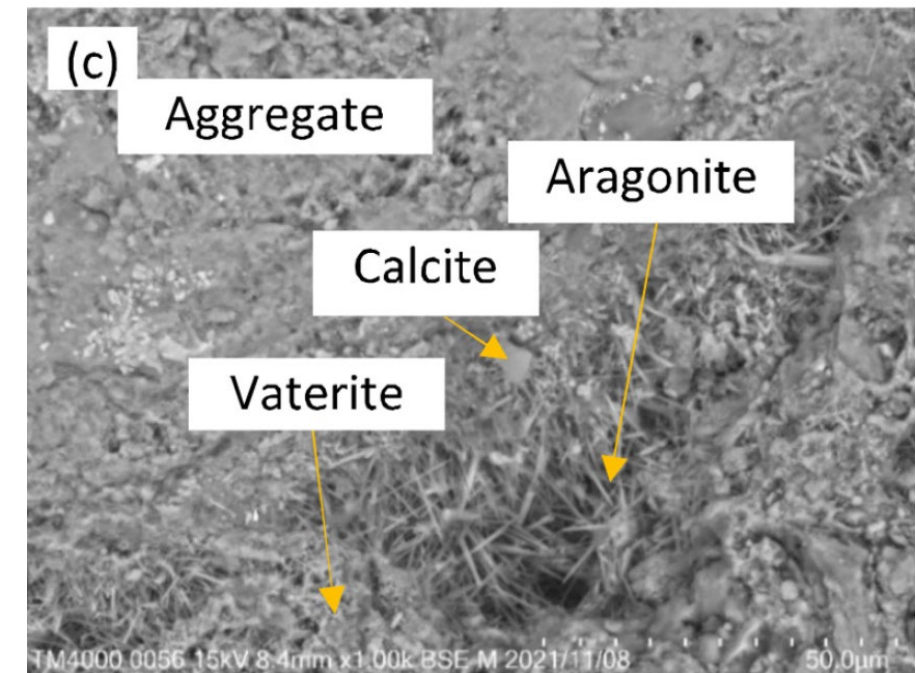
# 開発経過 (強度増大)

積層法



# 強度発現メカニズム

- 適切な粒度分布による初期状態が必要
- 炭酸カルシウムのうちアラゴナイトが強度増進に必要（粒子間の中の応力伝達を針状結晶が可能とするため）
- アラゴナイトが多い温度条件（70℃）での生成条件が重要

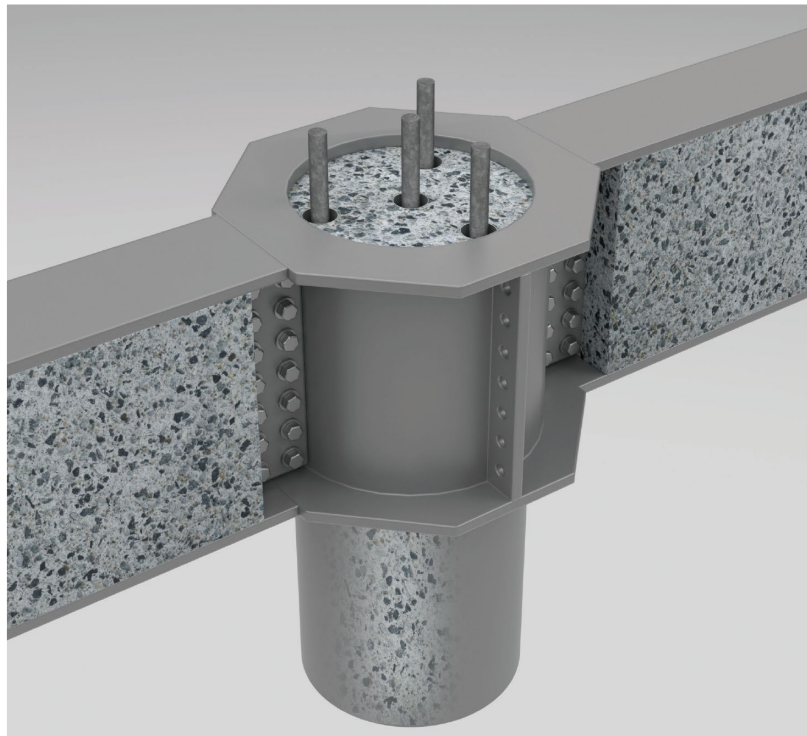


# 強度発現メカニズム

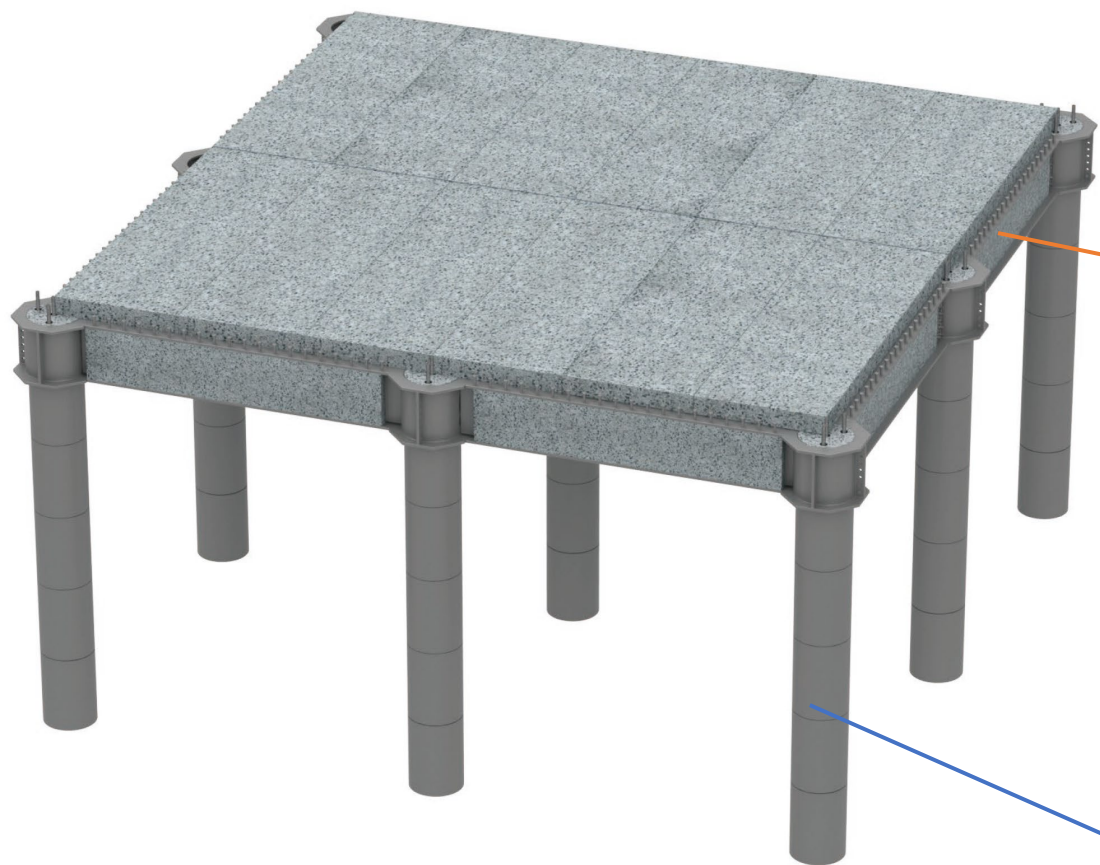
- 加圧充填時のアーチアクションの抑制・制御が重要
  - 粒度分布の最適化
    - ➡ CCCの空隙率低下
  - 骨材とCa(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液の混合比率の最適化
    - ➡ 骨材粒子の適切配置、CCCの空隙率低下
  - 骨材同士の接触面積の増大
    - ➡ 加圧成形後のCCC骨格構造の強化
- ➡ 圧縮強度の増大**
- 加圧成形後のCCCの105℃乾燥
    - ➡ 骨材界面での炭酸カルシウムの析出 ➡ CCCの緻密化および骨材粒子の結合
  - Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>溶液への浸漬と乾燥（二次養生）
    - ➡  $\text{Ca(HCO}_3)_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  による炭酸カルシウムのさらなる析出
    - ➡ 反応により生じたCO<sub>2</sub>によるCCC骨材中の未炭酸化Caのさらなる炭酸化

**➡ 圧縮強度のさらなる増大**

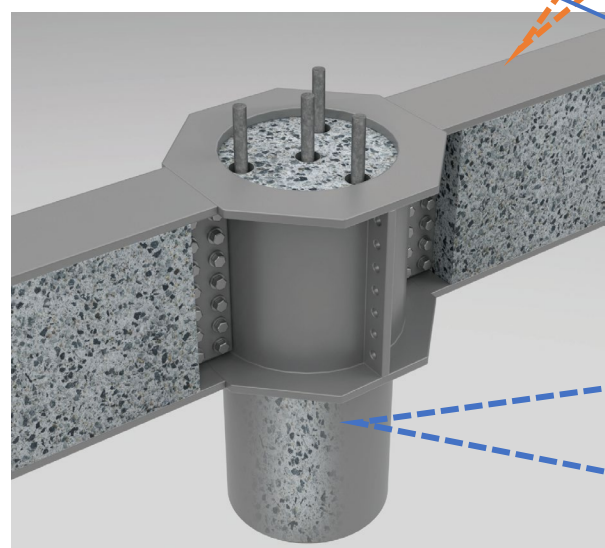
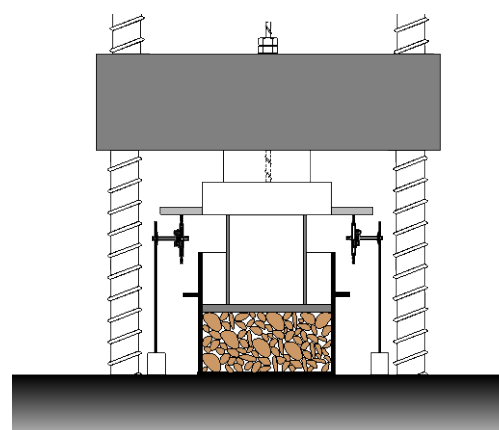
# プロジェクトⅢ：CCCの社会実装



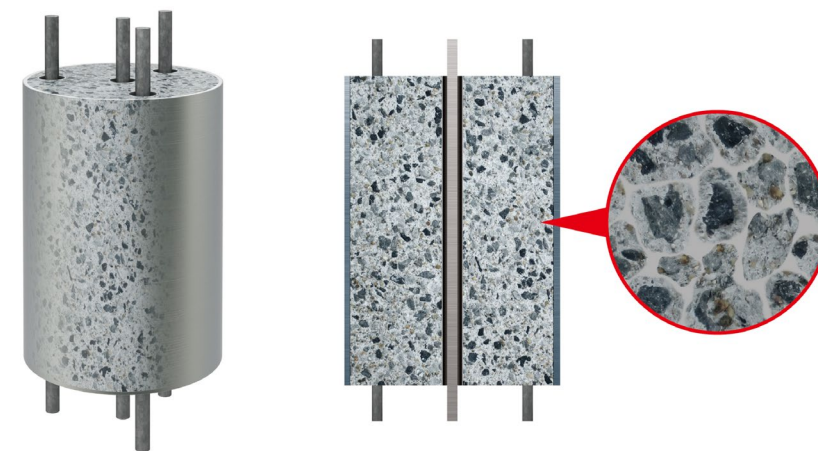
# CCCを用いた構造形式の提案



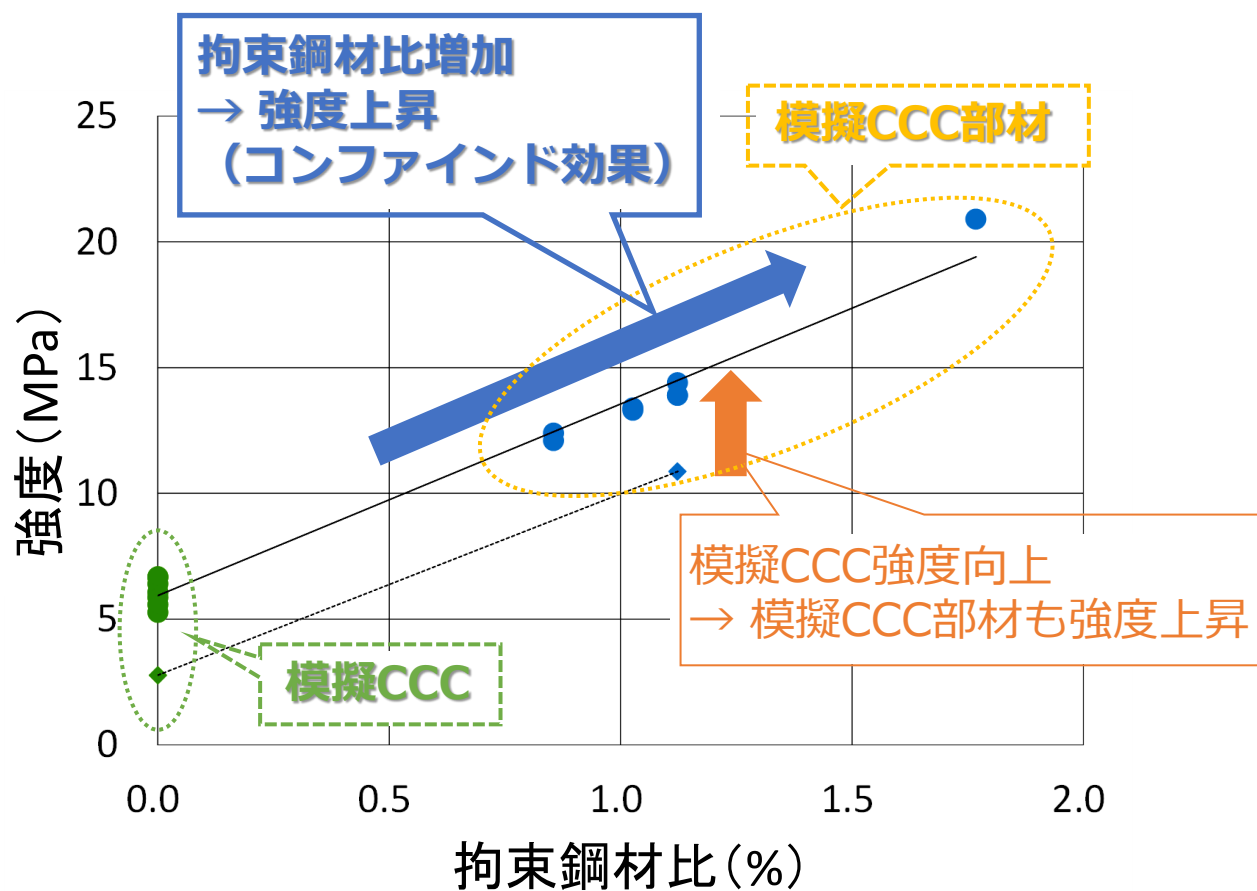
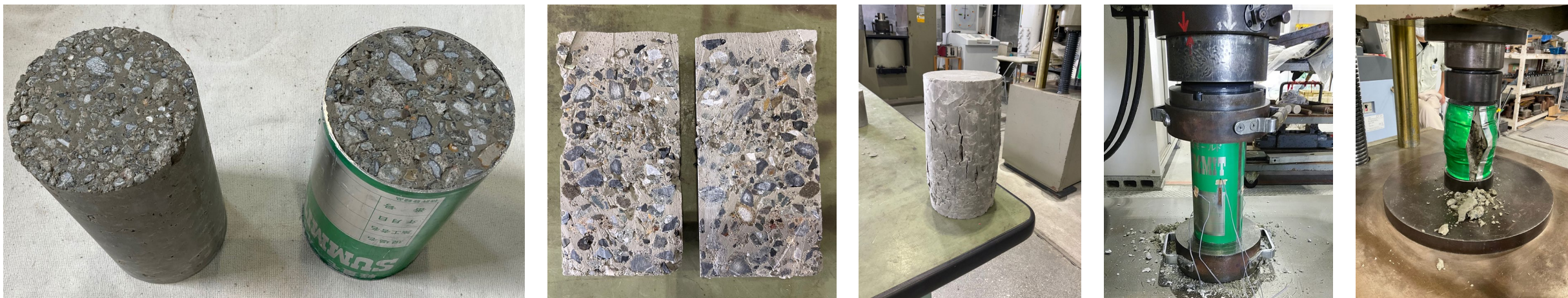
【梁：圧密】



【柱：圧密or析出+プレストレス】

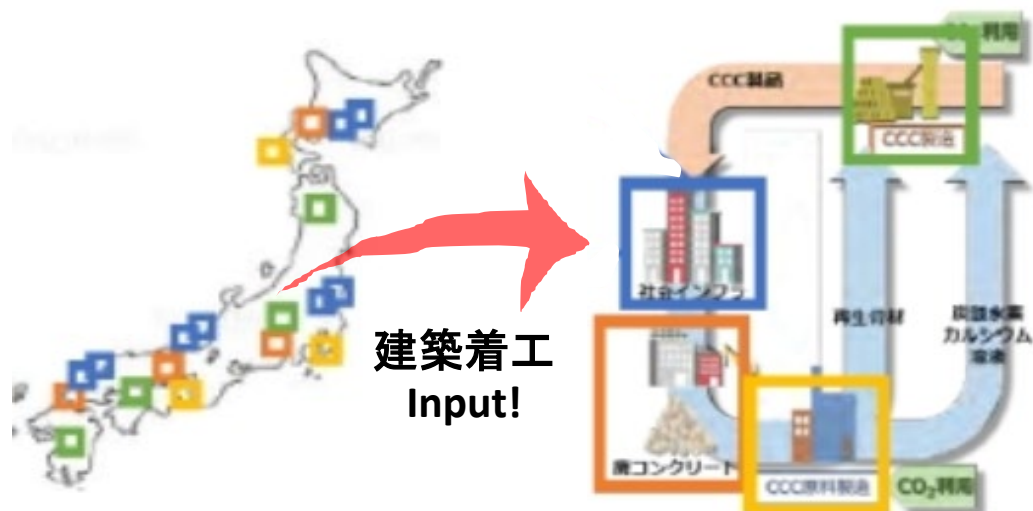


# CCC部材（柱）の力学性能評価



- 低強度域において、**コンファインド効果**を確認
- (模擬)CCCの強度と拘束鋼材比の関係から(模擬)**CCC部材の強度を推定**することが可能  
→ 低層構造物の**構造部材として活用**できる可能性を確認

# CCC原材料の蓄積量



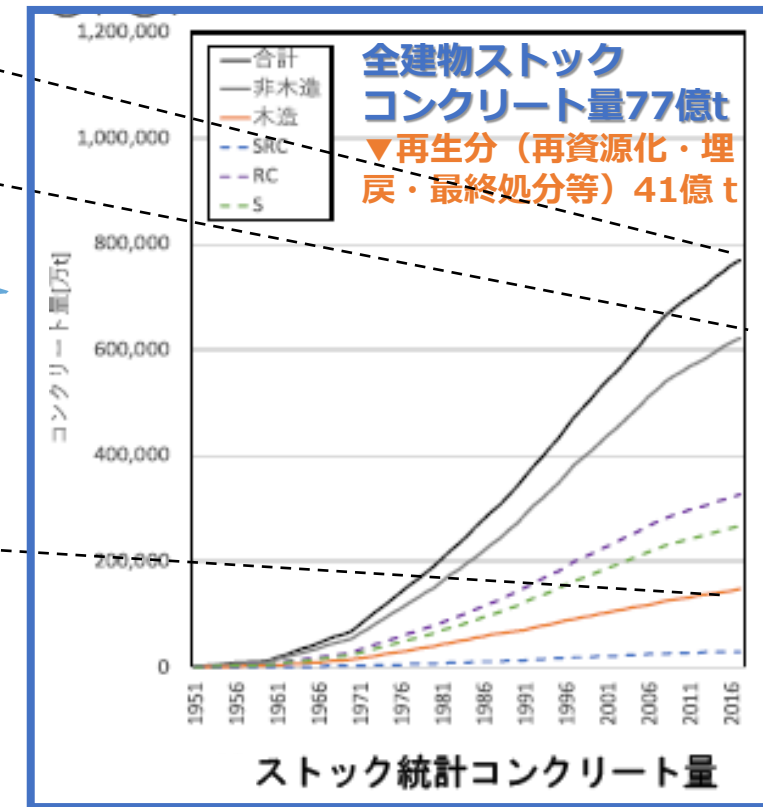
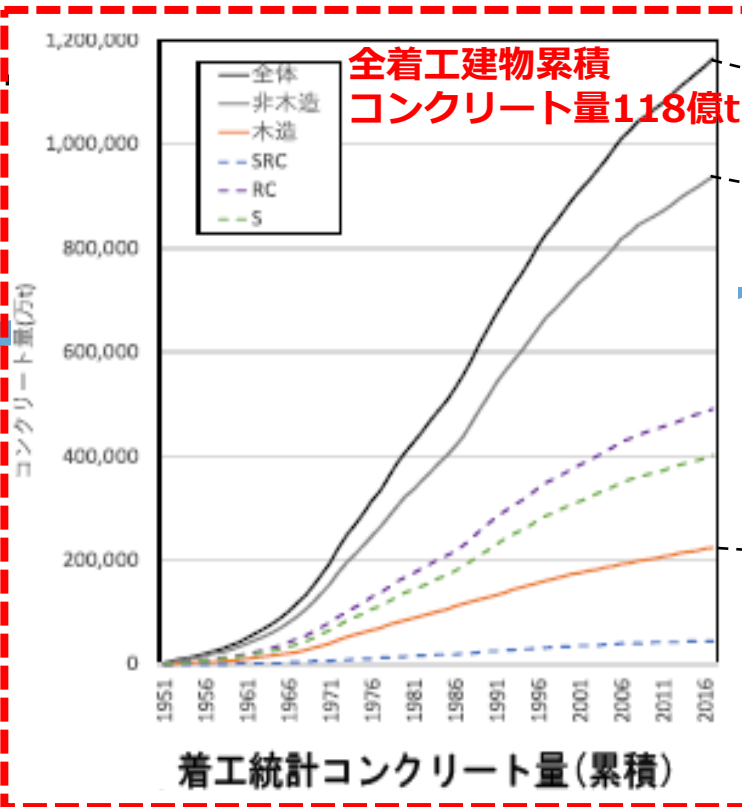
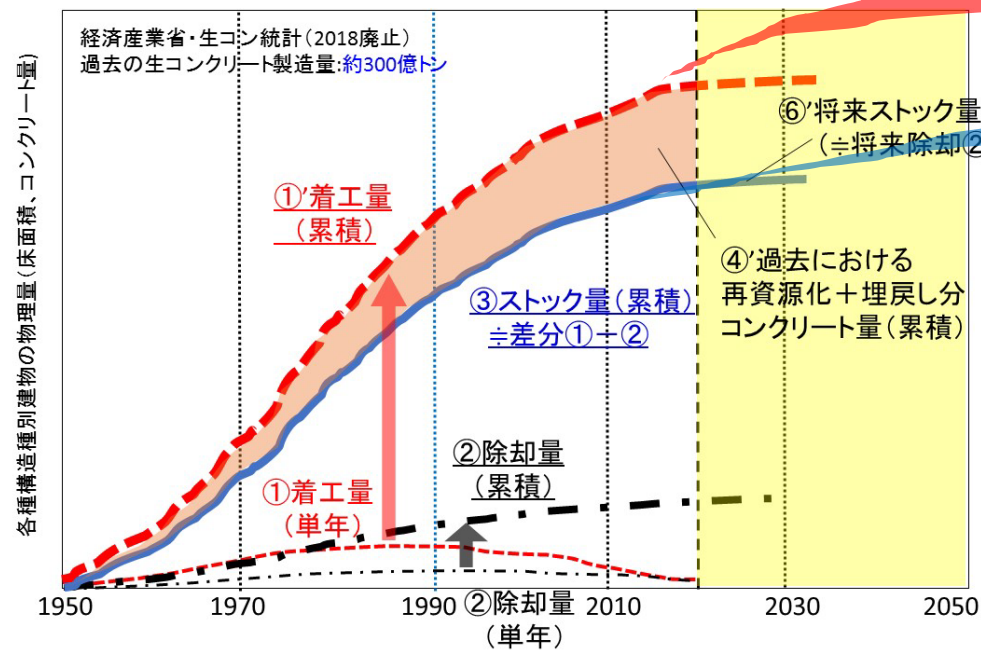
- 建築着工統計・建築物ストック統計等の各種統計資料に基づく調査
- ① 現在までの建築物着工量(m<sup>2</sup>)とコンクリート製造量(m<sup>3</sup>, t)
  - ② 現在の建築物ストック量(m<sup>2</sup>)とコンクリート蓄積量(m<sup>3</sup>, t)
  - ③ 過去からのコンクリート製造・蓄積量(m<sup>3</sup>, t)
  - ④ 建築物の寿命(年)
  - ⑤ 将来のコンクリート廃棄物発生量(m<sup>3</sup>, t)

建築物ストック(民・公): 約83億8187万m<sup>2</sup>  
 コンクリート蓄積量 : 約34億2819万m<sup>3</sup>  
 \* 原単位(コンクリート0.41m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

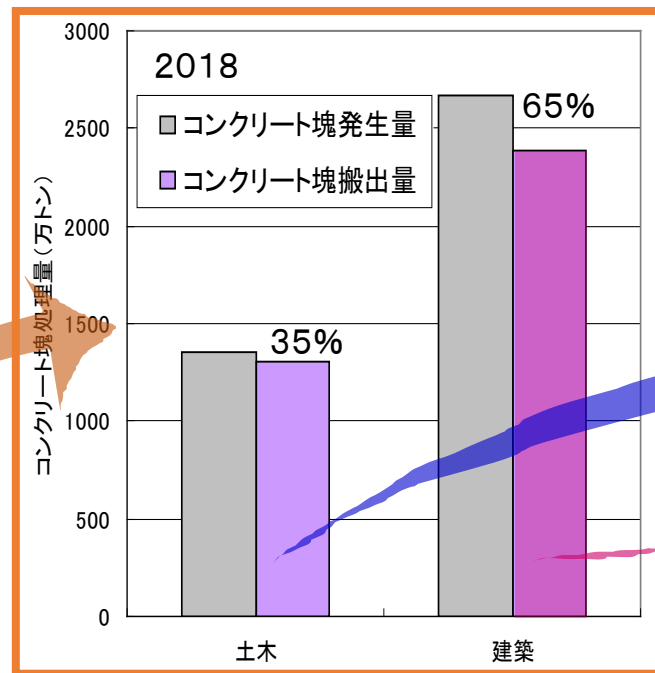
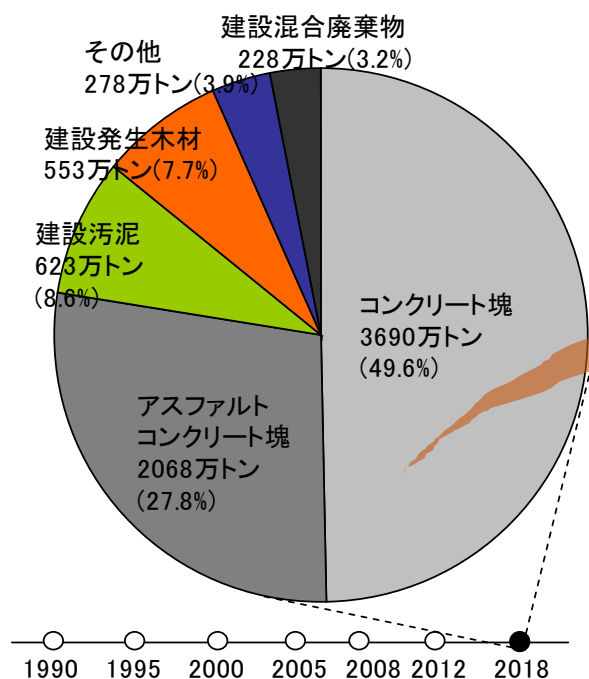
## 全着工建築の累積コンクリート製造量: 118億トン

- 構造別コンクリート: RC造38.3%, S造33.3%, 木造19.2%, SRC造8.5%
- 地域別: 都市部比較(関東・関西)、都道府県別比較(全47) など
- \* 生コン統計(経産省) 過去製造量: 約300億トン(建築40%・土木60%)

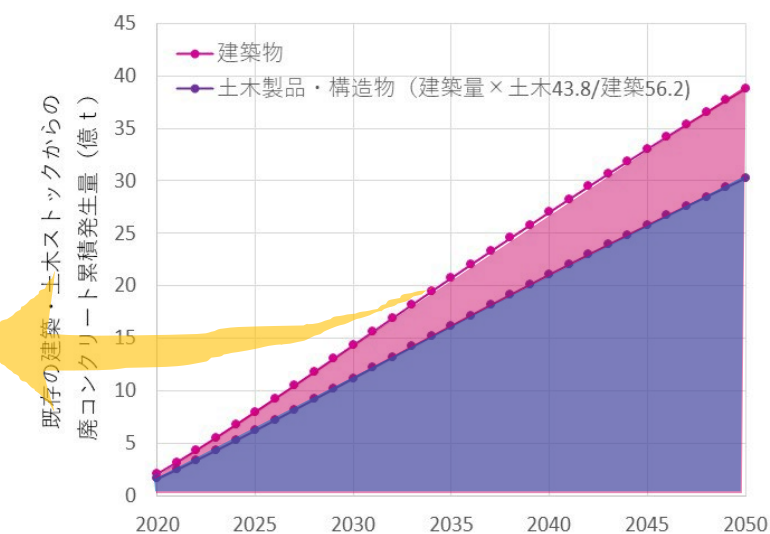
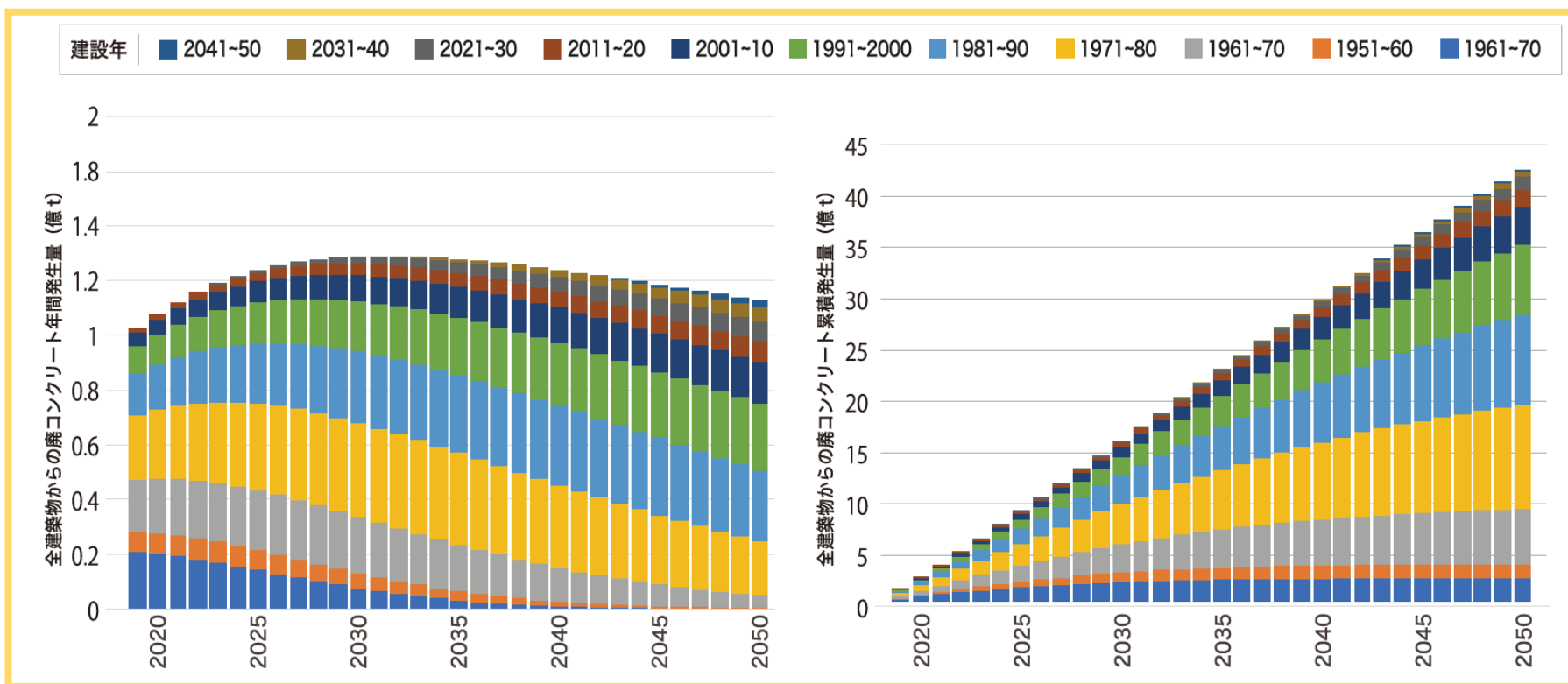
### C4Sに適した中間処理施設・CCC原材料製造工場・CCC製造工場等の配置の検討



# 廃コンクリートの発生量



土木・建築における建設廃棄物の搬出量比較(2018)

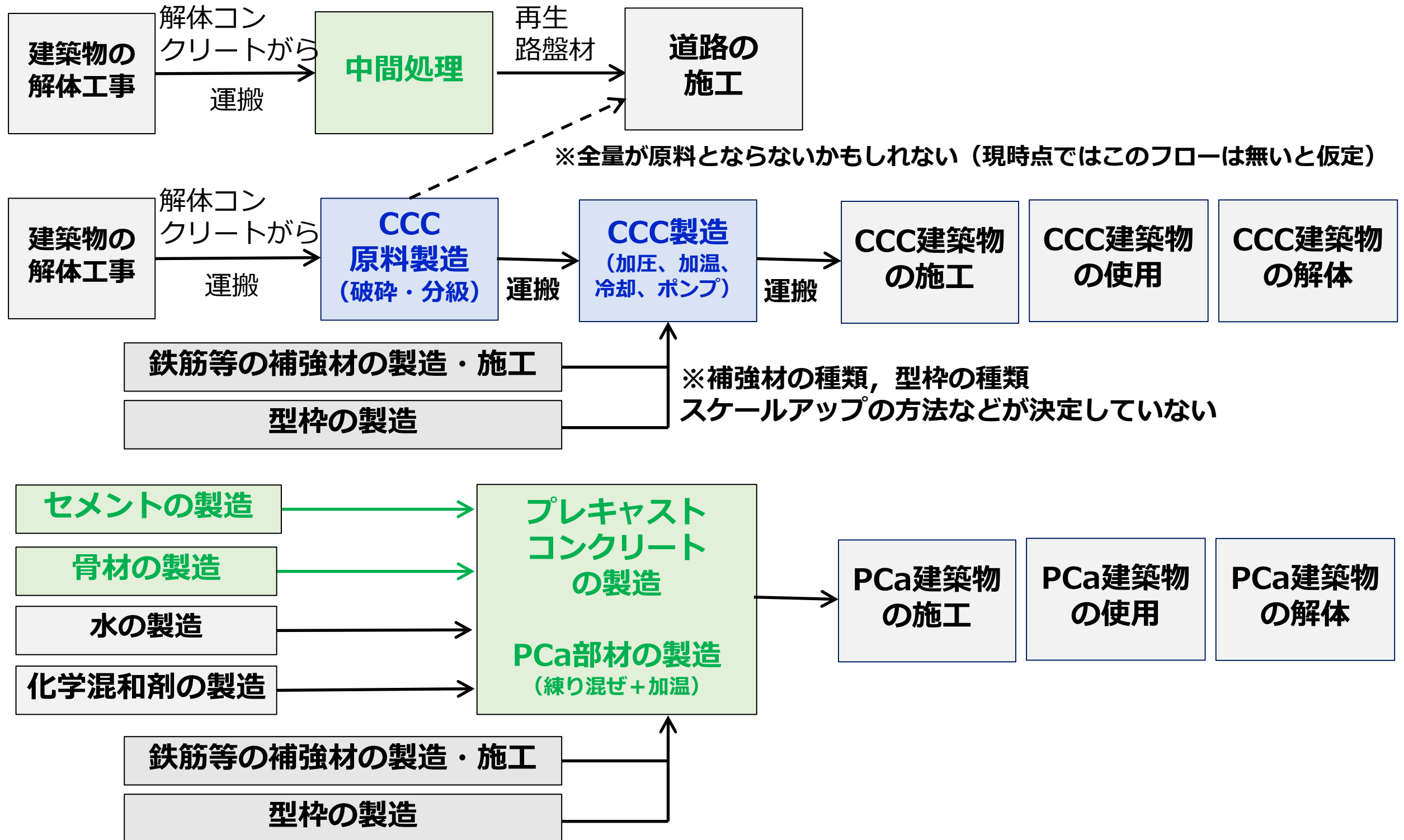


廃コンクリート発生量 (2020-2050:30yr)

- ・建物 : 39億t (平均1.26億t/年)
- ・土木製品 : 30億t (平均1.00億t/年)



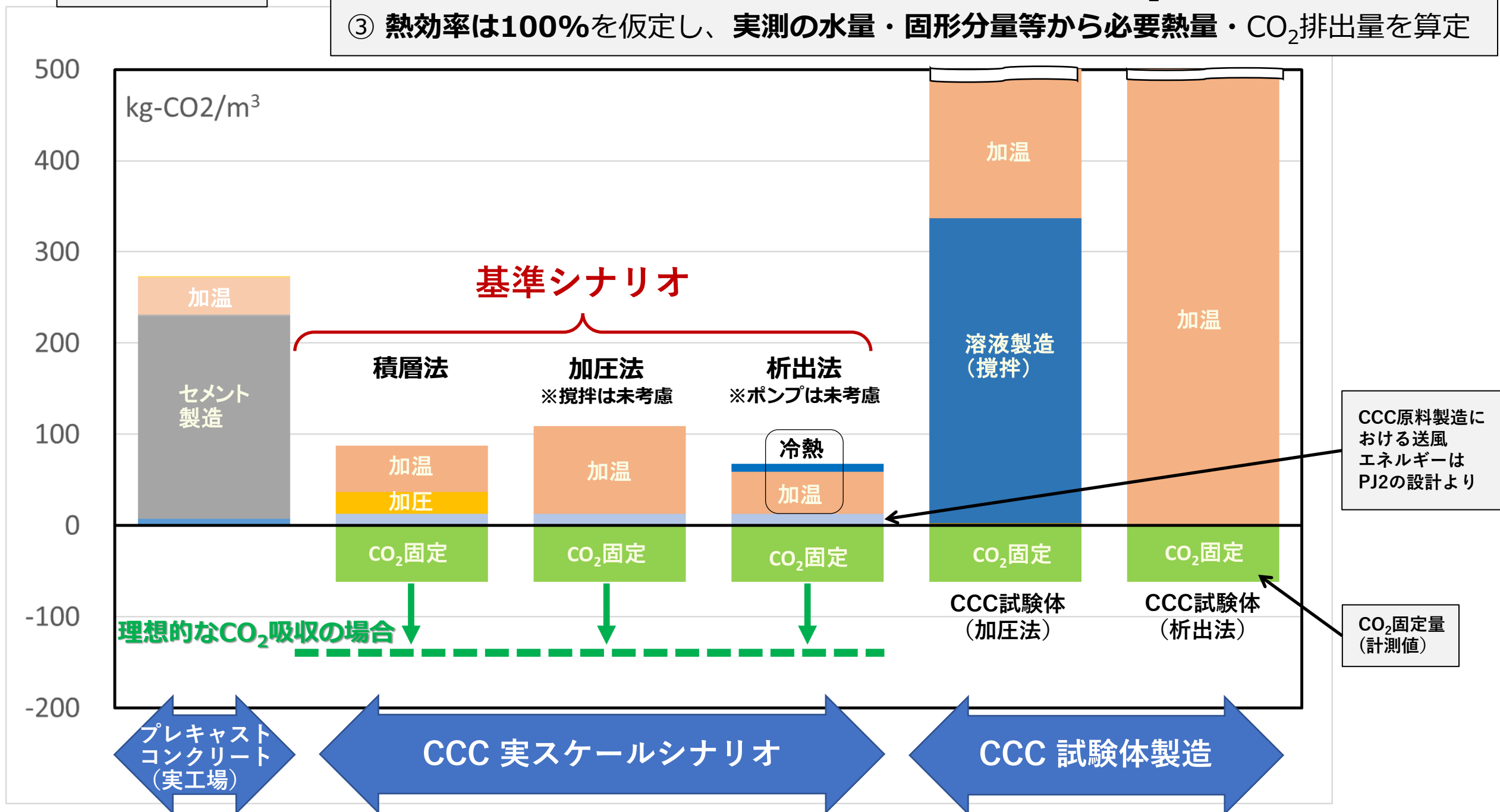
# CCC製造におけるLCA評価（バウンダリの設定）



# CCC製造におけるCO<sub>2</sub>排出量の推計

基準シナリオ =

- ① CR2-LCA-WGで提供された標準原単位 (kg-CO<sub>2</sub>/MJ)を用いて計算
- ② CCC原料製造時は送風DACで炭酸化、CCC製造時に純粋CO<sub>2</sub>養生なし
- ③ 熱効率は100%を仮定し、実測の水量・固形分量等から必要熱量・CO<sub>2</sub>排出量を算定



# 今後の展開

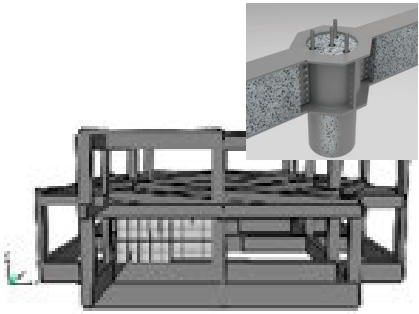


# 社会実装スケジュール（構想）

年度	CCCの開発・普及	CCC生産量	法律・規格の制定・改正
2022	12N/mm <sup>2</sup> の圧縮強度達成	0 千t	
2024	実験建造物の建設	0.1 千t	
2029	低層CCC造建築物 2~3棟の建設	2 千t	①建築基準法第20条に基づく大臣認定の取得
2040	毎年1.725倍増	345 千t	②日本建築学会規準・標準仕様書の制定 ③建設省告示1446号（技術的基準）の改正 ④建築基準法第37条2項に基づく大臣認定の取得 ⑤日本産業規格（JIS）の制定 ⑥建設省告示1446号（技術的基準）の改正 ⑦建築基準法第37条1項への適合
2050	コンクリート構造物の50%がCCC造	110,000 千t	

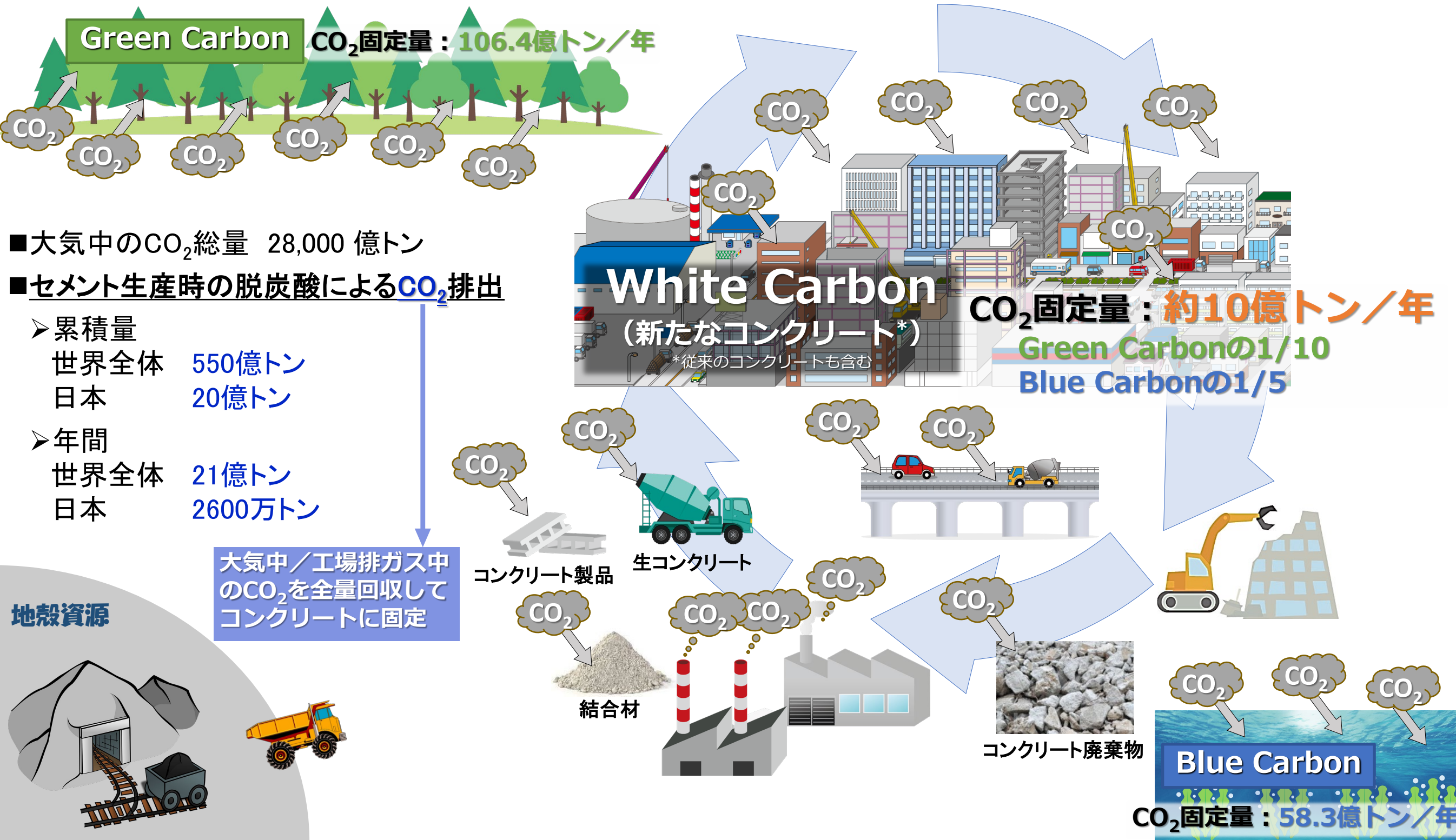
コンクリートの必要最低強度：**12N/mm<sup>2</sup>**  
建築基準法施行令第74条「鉄筋コンクリート造に使用するコンクリートの強度は、次に定めるものでなければならない。」

2025年：大阪万博での実験建造物の展示



CO<sub>2</sub>吸収量  
日本：▲2,620万t-CO<sub>2</sub>/年  
世界：▲約21億t-CO<sub>2</sub>/年

# CCC = White Carbon



ご清聴ありがとうございました。  
 2022年度末の目標は達成されました。  
 今後、2050年カーボンニュートラル社会を  
 実現するために、CCCの社会実装に向けて、  
 全員一丸となって検討を加速させていただきます。

救え、地球を！

C4Sで！！