

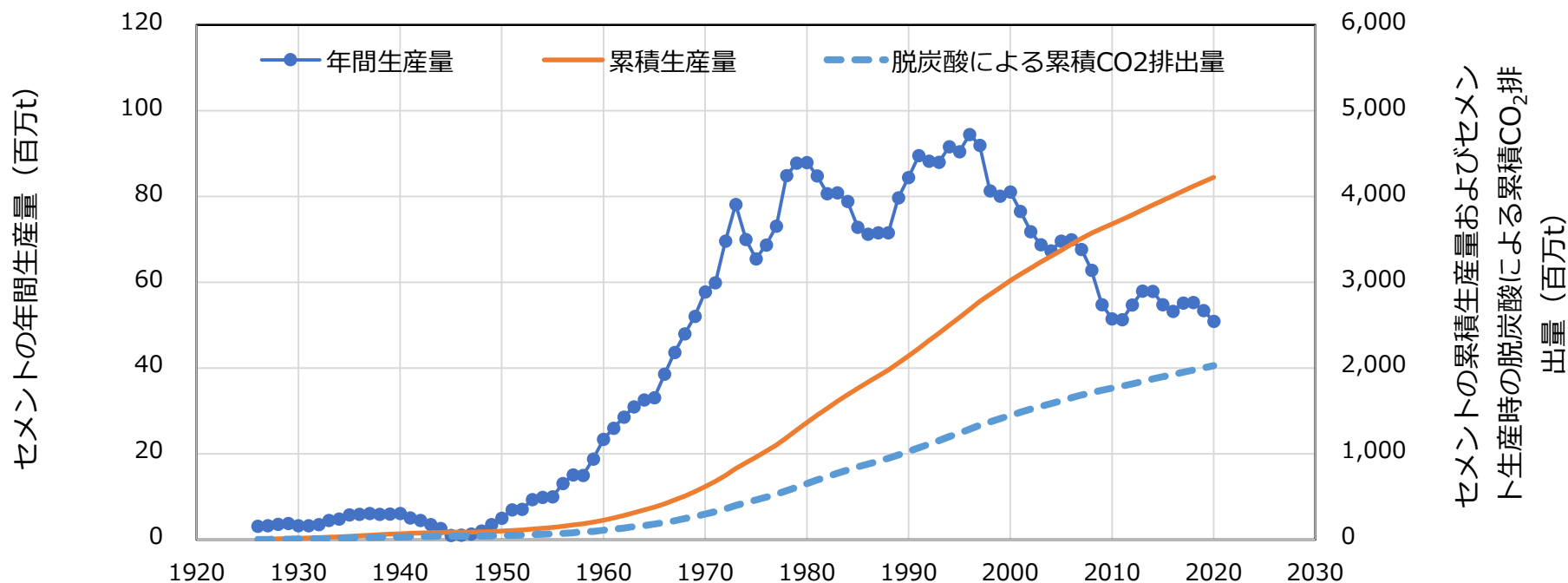
C⁴S研究開発プロジェクト



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CO₂排出）、目的

日本



■ 大気中のCO₂総量
28,000億トン

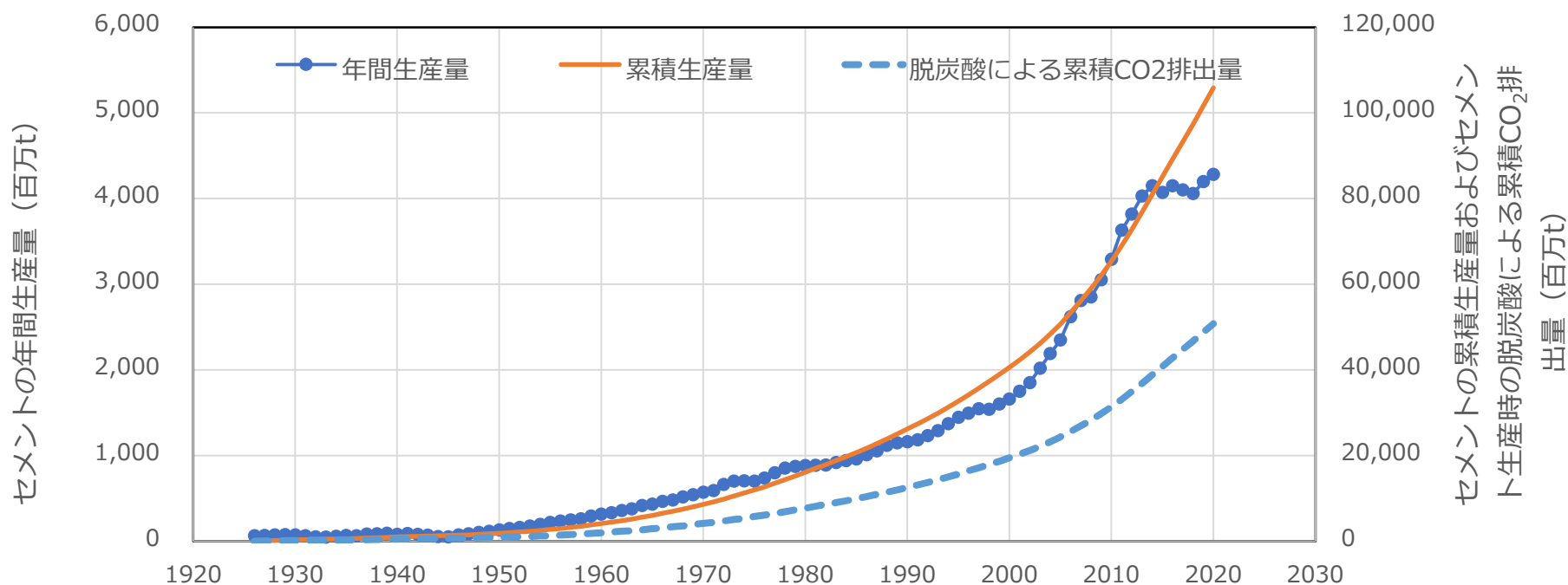
■ セメント生産時の
脱炭酸によるCO₂排出

▶ 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	2,620万トン

コンクリートによる
回収・利用 (CCUS)

世界全体



社会的背景、CCUSの方法



石灰石 (CaCO₃) を採取し、セメントなどを生産

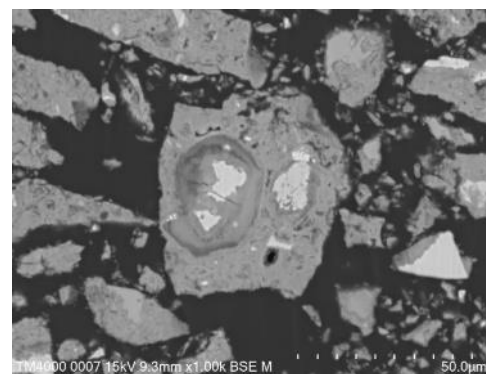
→ カルシウム (Ca) を用いようとすると常に **CO₂** 発生



世界各地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 (Ca) 源 (**CO₂** と反応して炭酸塩化)



廃コンクリートを粉砕



空気中のCO₂を結合



炭酸カルシウム (CaCO₃) 生成

CCC

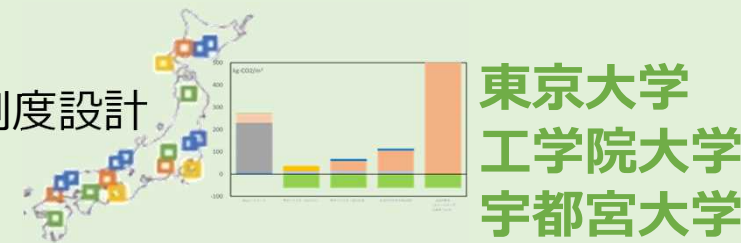
カルシウムカーボネートコンクリート (CCC) を製造し、セメント製造時に石灰石の脱炭酸によって放出された大気中の **CO₂** を **Ca** によって **回収・固定** し、CO₂ と Ca を永久に循環

C⁴S研究開発プロジェクトの全体像・実施体制

**目標：C⁴S実現の場合の2050年のDAC量
(コンクリートの50%がCCC)**
 日本：▲1,300万t-CO₂/年
 世界：▲約10億t-CO₂/年

C⁴Sの社会実装 (PJⅢ)

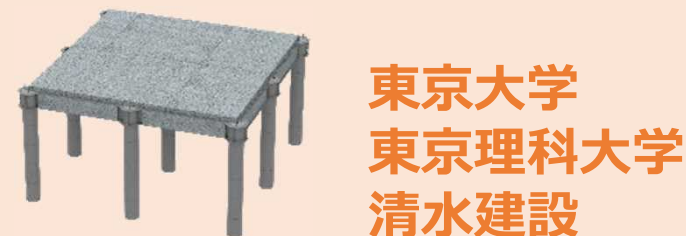
建築基準法に関するデータ整備・制度設計
 資源循環シナリオ設計
 CO₂排出削減・固定効果分析



CCC部材製造原理の開発 (PJⅠ)

CCC造建築物の構造設計・性能評価法の開発 (PJⅢ)

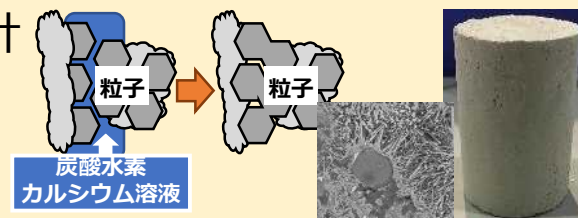
CCC部材：製造、架構形式、性能評価
 CCC造建築物：構造設計、施工



CCC反応制御技術の開発 (PJⅠ)

CCCユニット：反応メカニズム、調合設計、製造・品質管理、性能評価
 CCCユニット製造プラント：パイロット設計

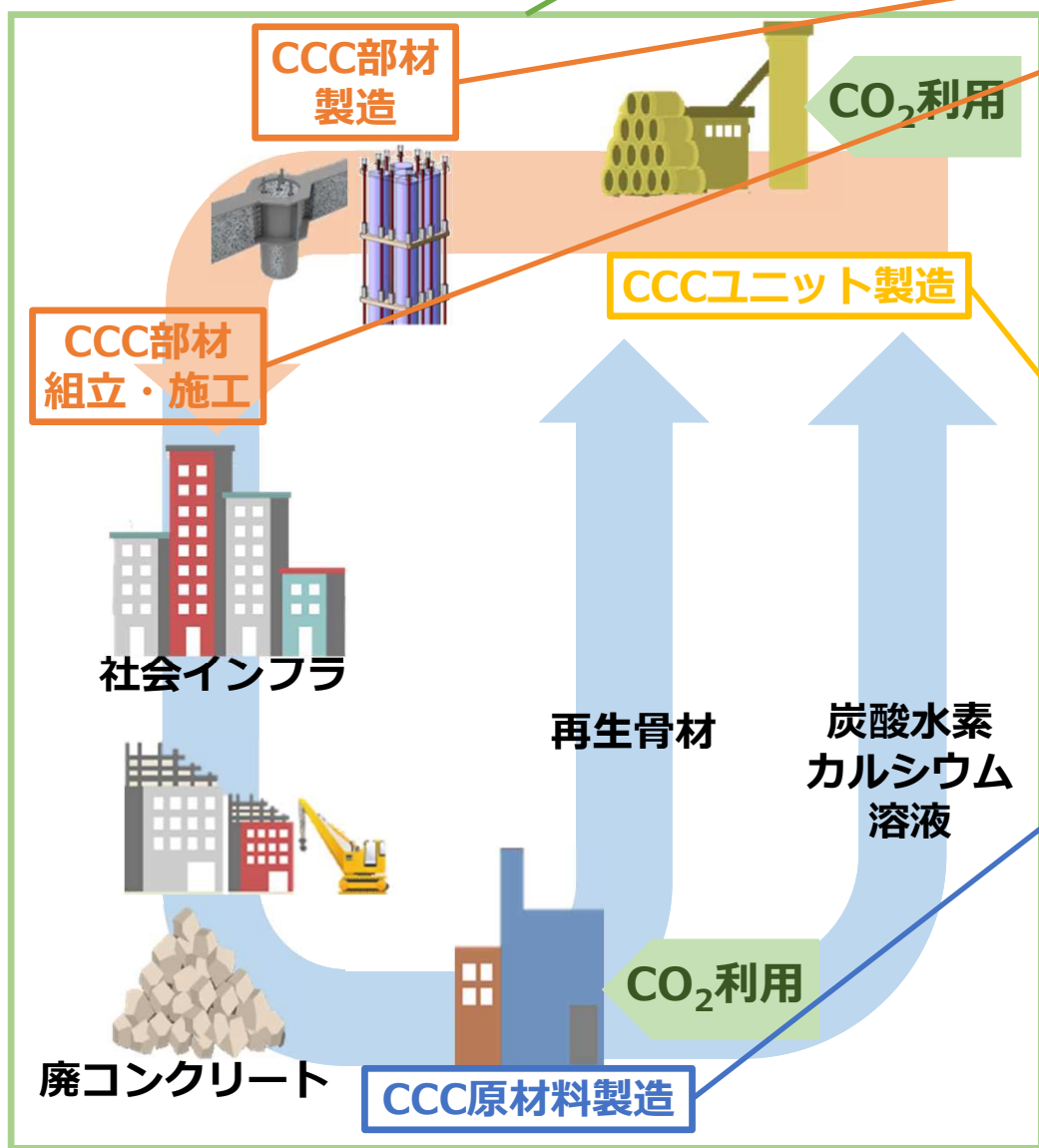
東京大学
 太平洋セメント



CCC原材料の製造プロセスの開発 (PJⅡ)

廃コンクリートの破碎・CO₂吸収固定
 ▶ 効率化・大規模化
 ▶ パイロットプラントへの展開

北海道大学
 増尾リサイクル

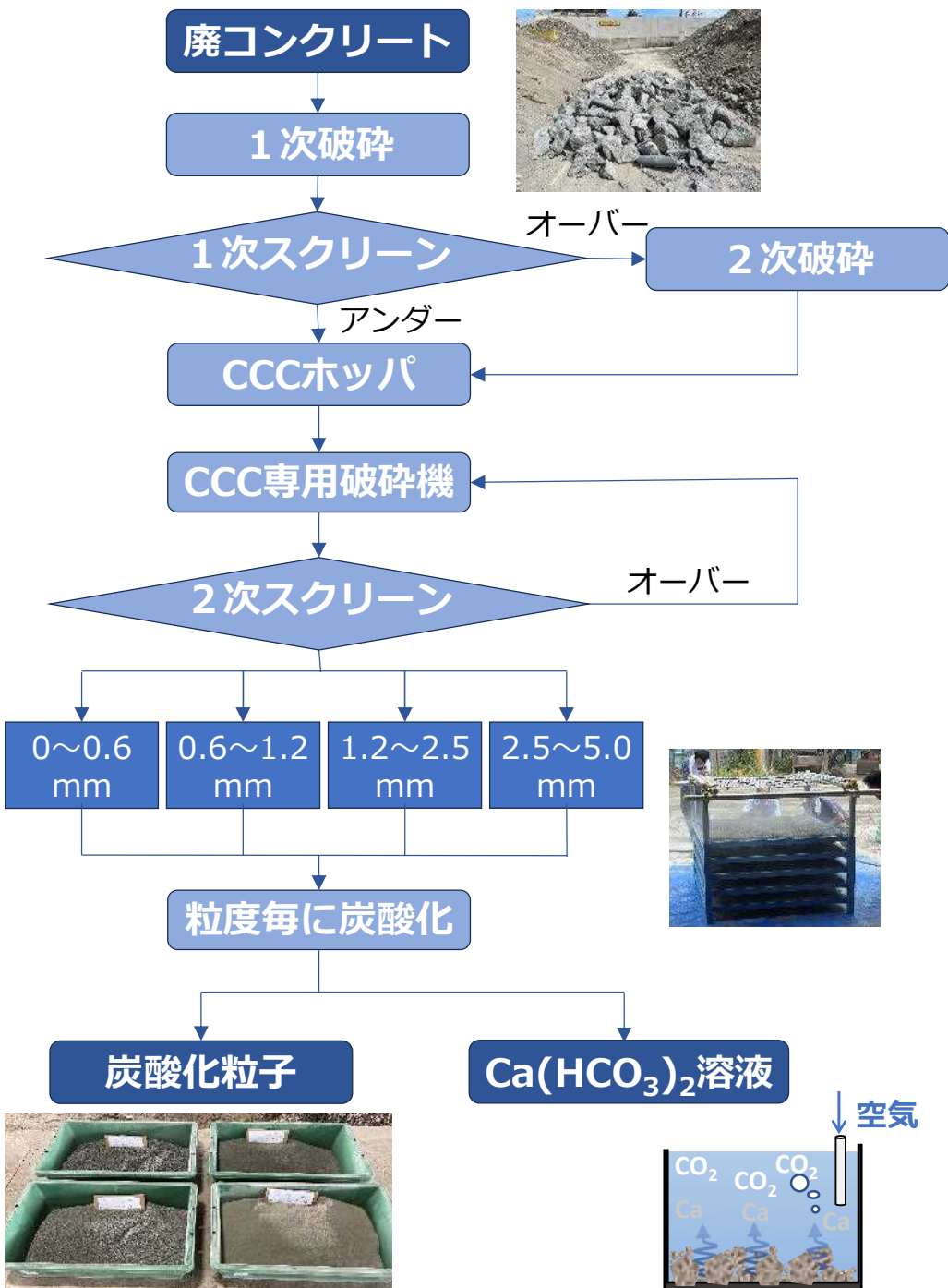


開発スケジュール・最終目標

研究開発項目	現時点の進捗・成果	2023年度末目標	2024年度末目標	2029年度末目標
KPI	<ul style="list-style-type: none"> ■2023年度末の強度目標は既に達成済み ■部材の製造方式ほぼ決定 	<ul style="list-style-type: none"> ■φ15×30cm試験体で安定して強度20MPa ■ベンチプラントで柱・梁部材の製造開始 	<ul style="list-style-type: none"> ■試験体で強度30MPa ■柱部材で強度12MPa ■ベンチプラントでの柱部材・梁部材の製造 ■模擬構造物の建設 	<ul style="list-style-type: none"> ■柱部材で強度30MPa ■耐震性・耐久性のある低層建築物の供給開始
① PJ I CCC反応制御技術・部材製造原理の開発	<ul style="list-style-type: none"> ■部材製造装置の製作中 ■安定強度が得られる粒度分布ほぼ決定 ■原材料特性とCCC物性との関係ほぼ解明 	<ul style="list-style-type: none"> ■ベンチプラントの製作 <ul style="list-style-type: none"> ➢φ0.15×0.3mの柱ユニット ➢0.2×0.1×1mの梁 ■安定した品質・性能を有する部材の製造原理の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ■ベンチプラントにおける部材製造 <ul style="list-style-type: none"> ➢柱ユニット120体/月 ➢梁42体/月 ■模擬構造物の建設 <ul style="list-style-type: none"> ➢W×D×H=2×1×3mの2層構造 	<ul style="list-style-type: none"> ■パイロットプラントにおける部材製造 <ul style="list-style-type: none"> ➢φ0.3×0.6mの柱ユニット250体/月 ➢0.4×0.2×2mの梁120体/月 ■建築物の建設 <ul style="list-style-type: none"> ➢2階建て
② PJ II CCC原材料の製造プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ベンチプラントの準備ほぼ終了 ■CO₂回収工程の改良中 	<ul style="list-style-type: none"> ■ベンチプラントの製作 ■効率的な原材料製造工程の確定 ■効率的なCO₂回収工程の確定 	<ul style="list-style-type: none"> ■ベンチプラントにおける原材料製造 <ul style="list-style-type: none"> ➢5トン/月 ■CO₂回収 <ul style="list-style-type: none"> ➢2960kg/年 	<ul style="list-style-type: none"> ■パイロットプラントにおける原材料製造 <ul style="list-style-type: none"> ➢90トン/月 ■CO₂回収 <ul style="list-style-type: none"> ➢54トン/年
③ PJ III CCC造建築物の構造設計法・性能評価法の開発およびC ⁴ Sの社会実装	<ul style="list-style-type: none"> ■構造形式の検討ほぼ終了 ■模擬部材の性能確認中 ■都道府県別製造プラント最適配置検討中 ■カーボンマイナス化に向けたトレードオフ分析実施中 	<ul style="list-style-type: none"> ■構造設計データの収集 ■国土交通大臣認定等に必要資料の明確化 ■地域性を踏まえた廃コンクリートの排出予測 ■ベンチプラントにおけるCO₂排出・吸収収支の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ■構造設計法の概略確立 ■国土交通大臣認定等の取得手順明確化・必要資料収集 ■最適な資源循環シナリオの方向性の提示 ■CO₂排出量最小化・吸収量最大化方策の提示 	<ul style="list-style-type: none"> ■構造設計法・耐久設計法の確立 ■構造方法に関する国土交通大臣認定の取得 ■建築材料に関する告示改正案の提示 ■最適な資源循環シナリオの完成 ■LCA評価に基づくC⁴Sの有効性の確認

CCCの製造工程、CCC構造物の建設工程

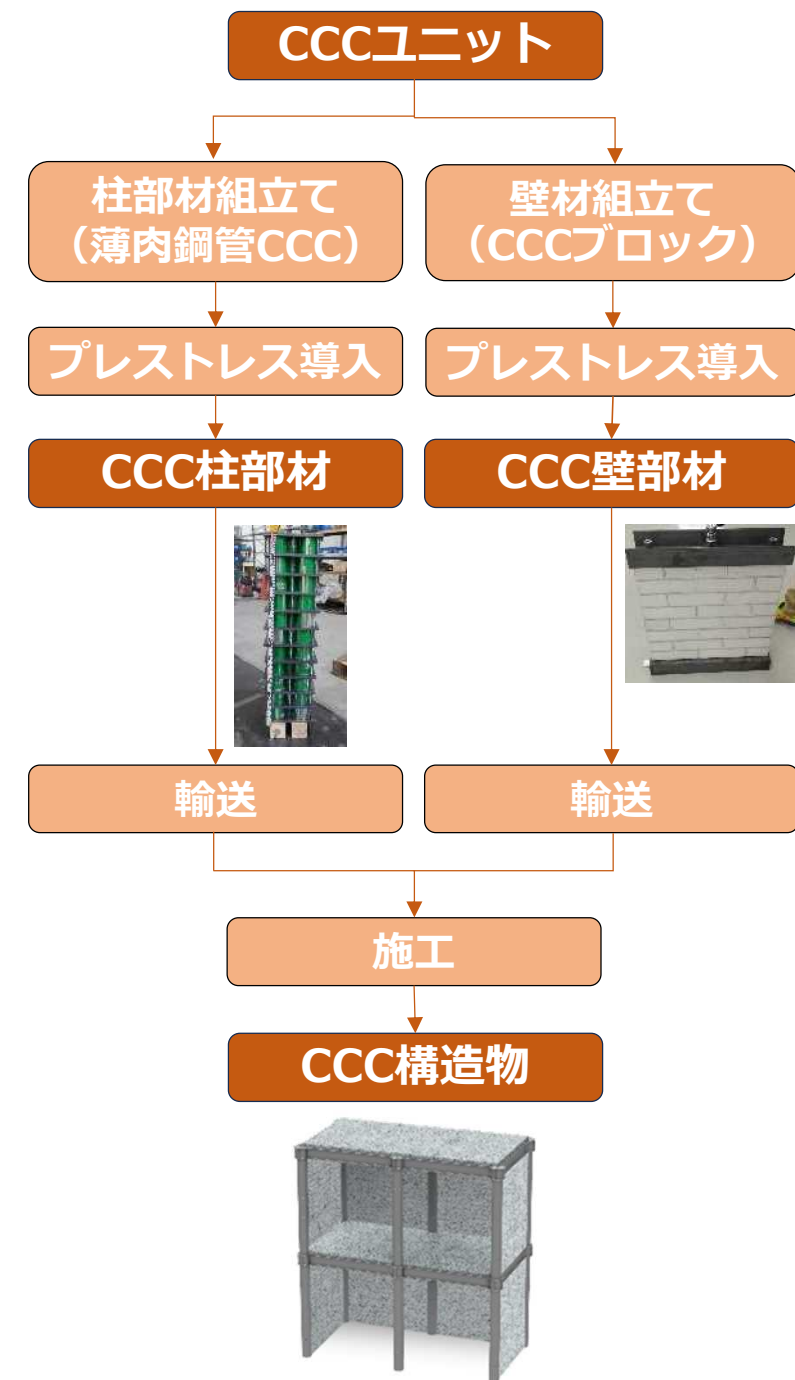
CCC原材料の製造



CCCユニットの製造



CCC部材の製造・施工



CCC原材料の製造プロセスの開発



CO₂固定量の促進手法の開発

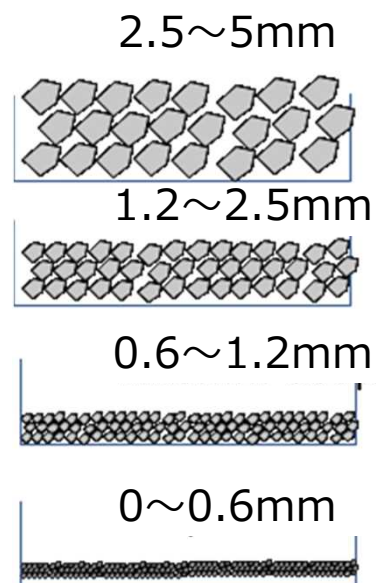
単一粒度化

廃コンクリートの**破碎・分級**→**単一粒度化**→**通気流路の確保**
→**粒度ごとに乾湿繰返し**による**炭酸化促進**→**DACの増進**

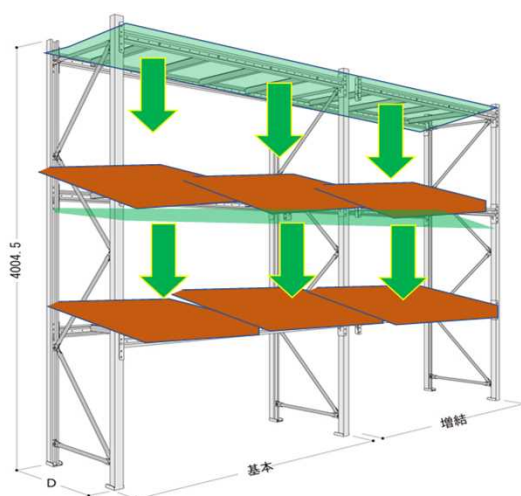
人頭大の
廃コンクリート



分級



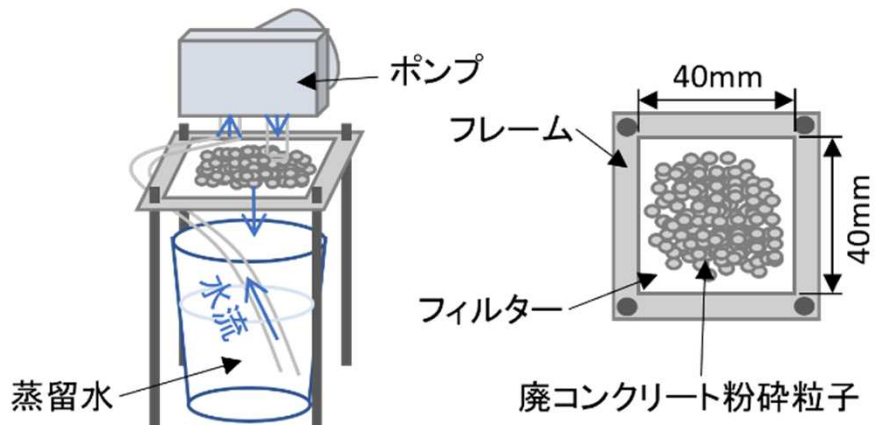
乾湿繰返し



- 炭酸化反応の促進
 $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$
- DACの増進

CO₂固定量の促進手法の開発

ドリップ法

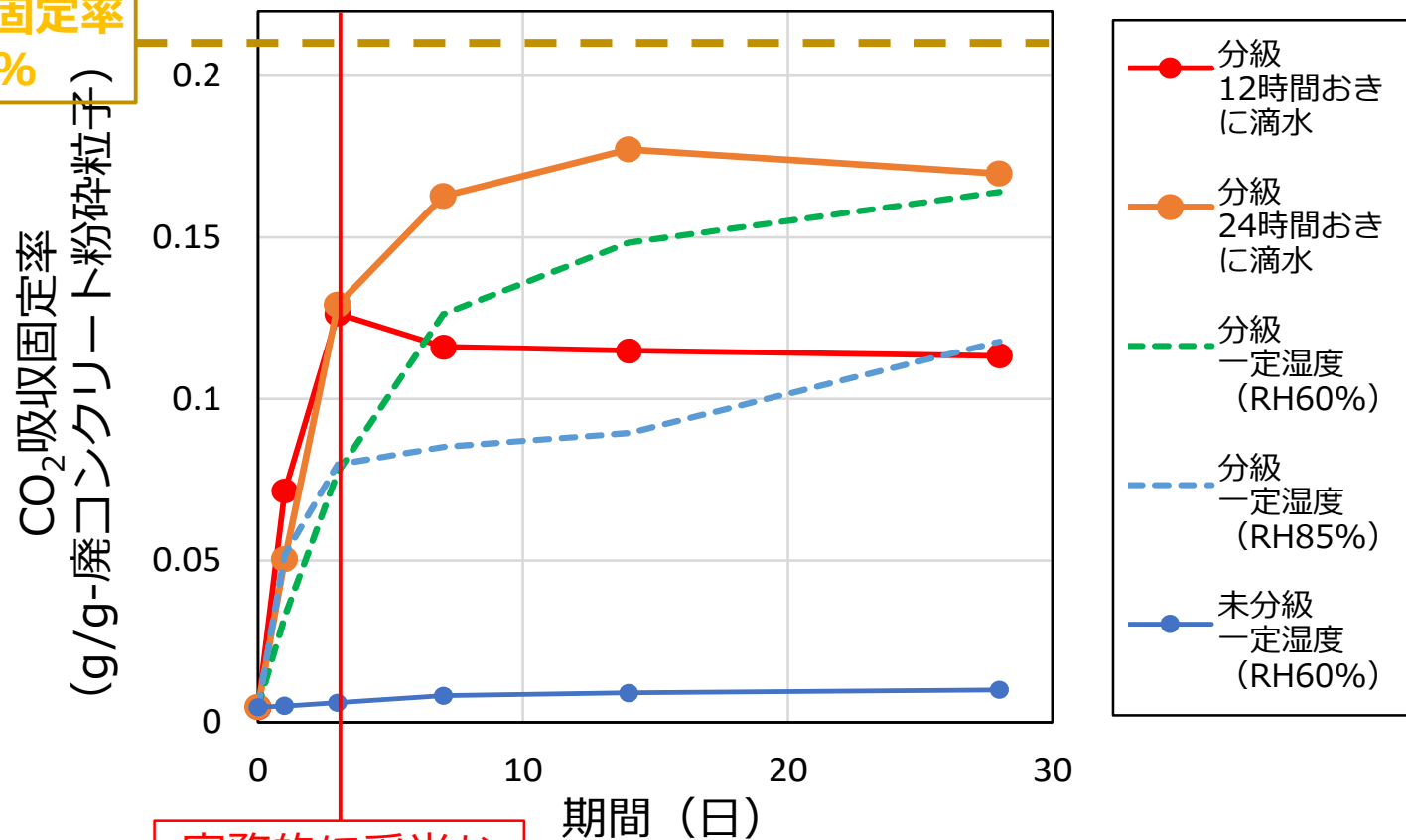


廃コンクリート粉碎粒子に周期的に15秒間滴水
 1.677g 12時間おき 8.238ml
 24時間おき

乾湿繰返し → Ca(OH)₂の炭酸化
 CSHの炭酸化促進

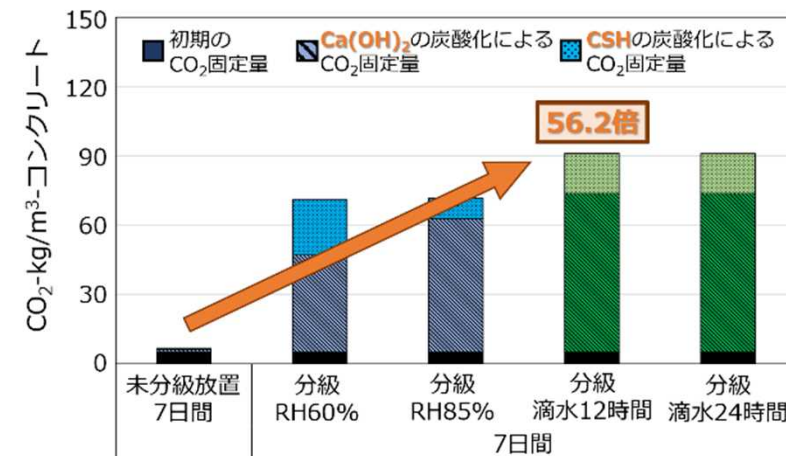


CO₂吸収固定率
100%



実務的に妥当な
製造期間 (3日)

ドリップ法は
DACによる炭酸塩化
において
実務的にも圧倒的に
有利な手法



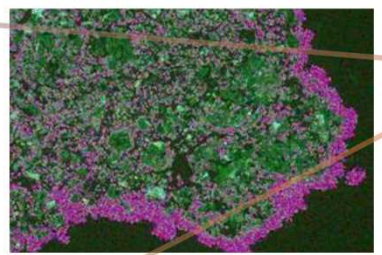
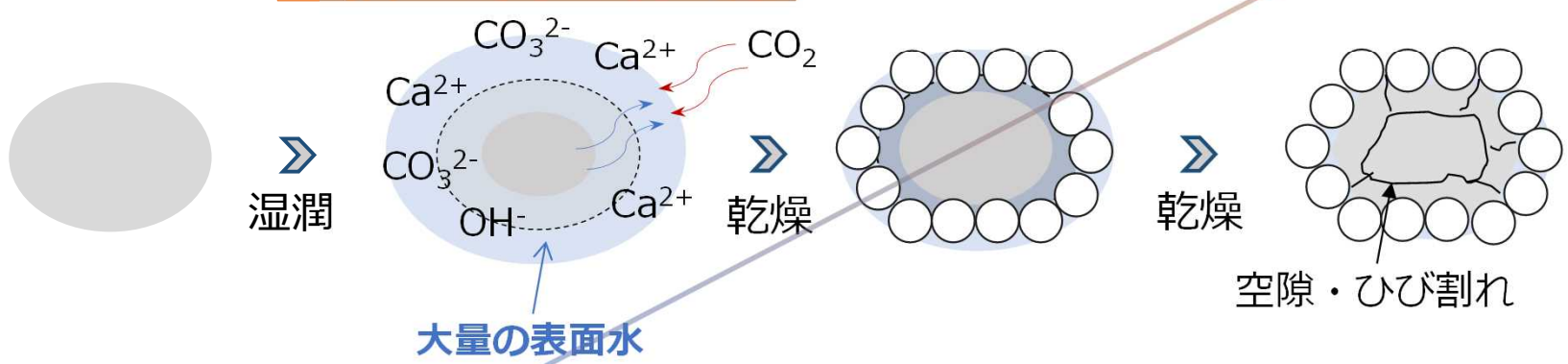
CO₂固定量の促進手法の開発

ドリップ法

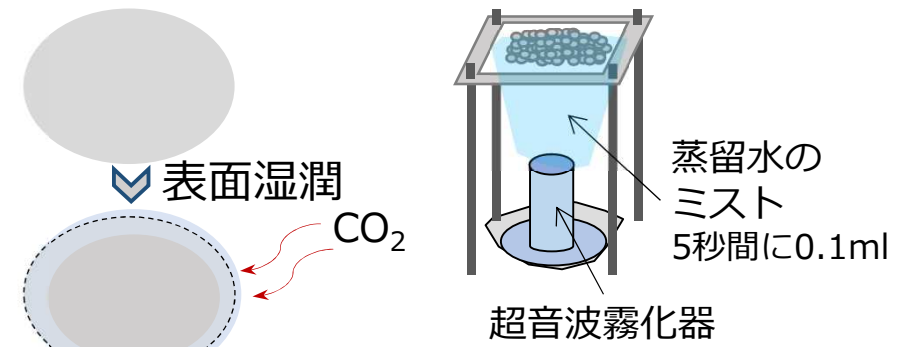
管理が簡単で極めて高速だが、粒子が脆くなる

● 水 ● 廃コンクリート粒子 ○ CaCO₃

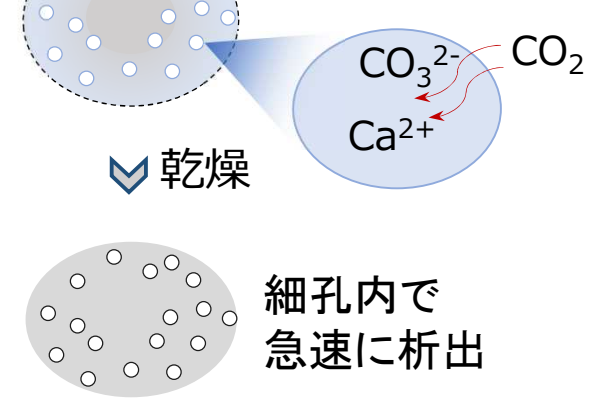
CO₂固定反応場：表面+外側



ミスト法



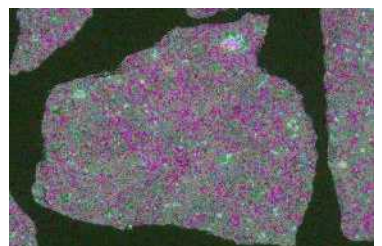
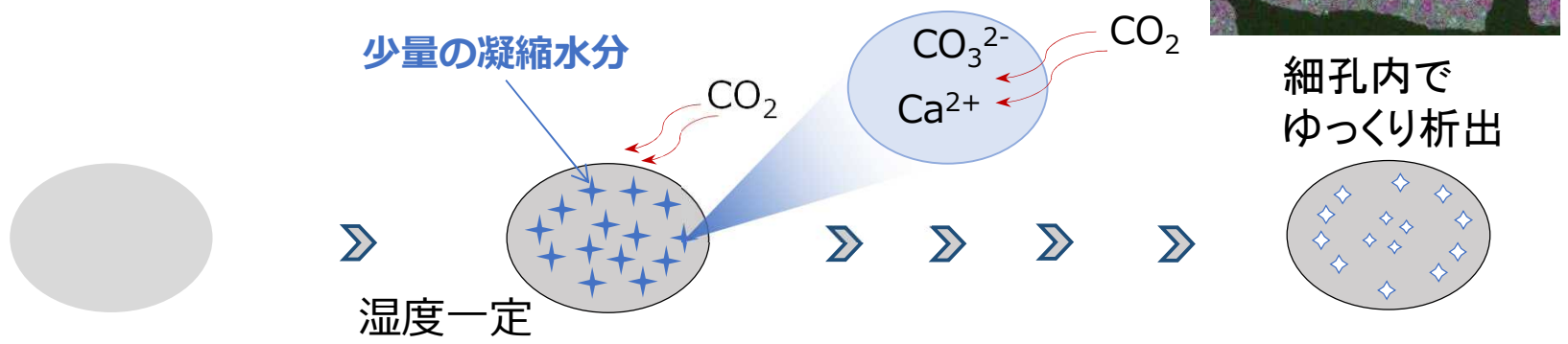
CO₂固定反応場：表面+細孔内部



一定湿度保持

管理が困難で速度は遅いが、粒子密度は高い

CO₂固定反応場：細孔内部



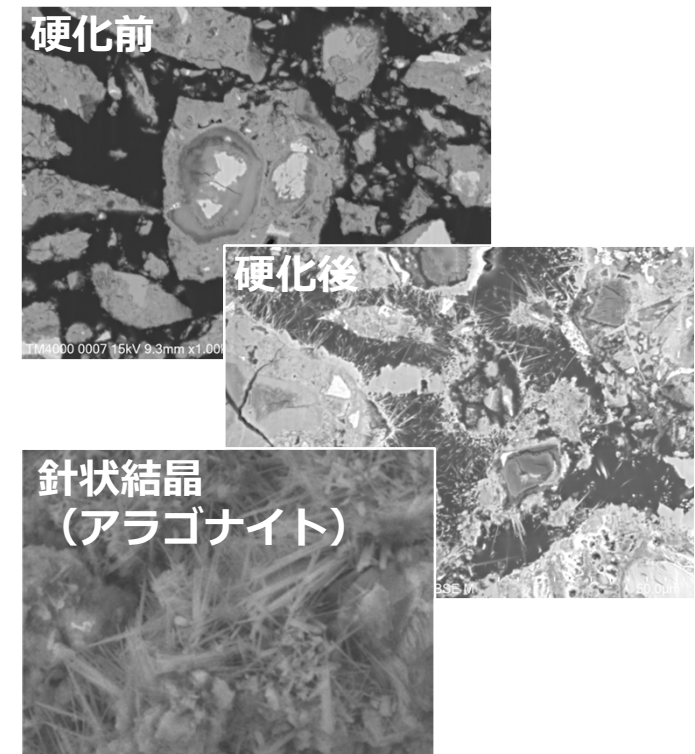
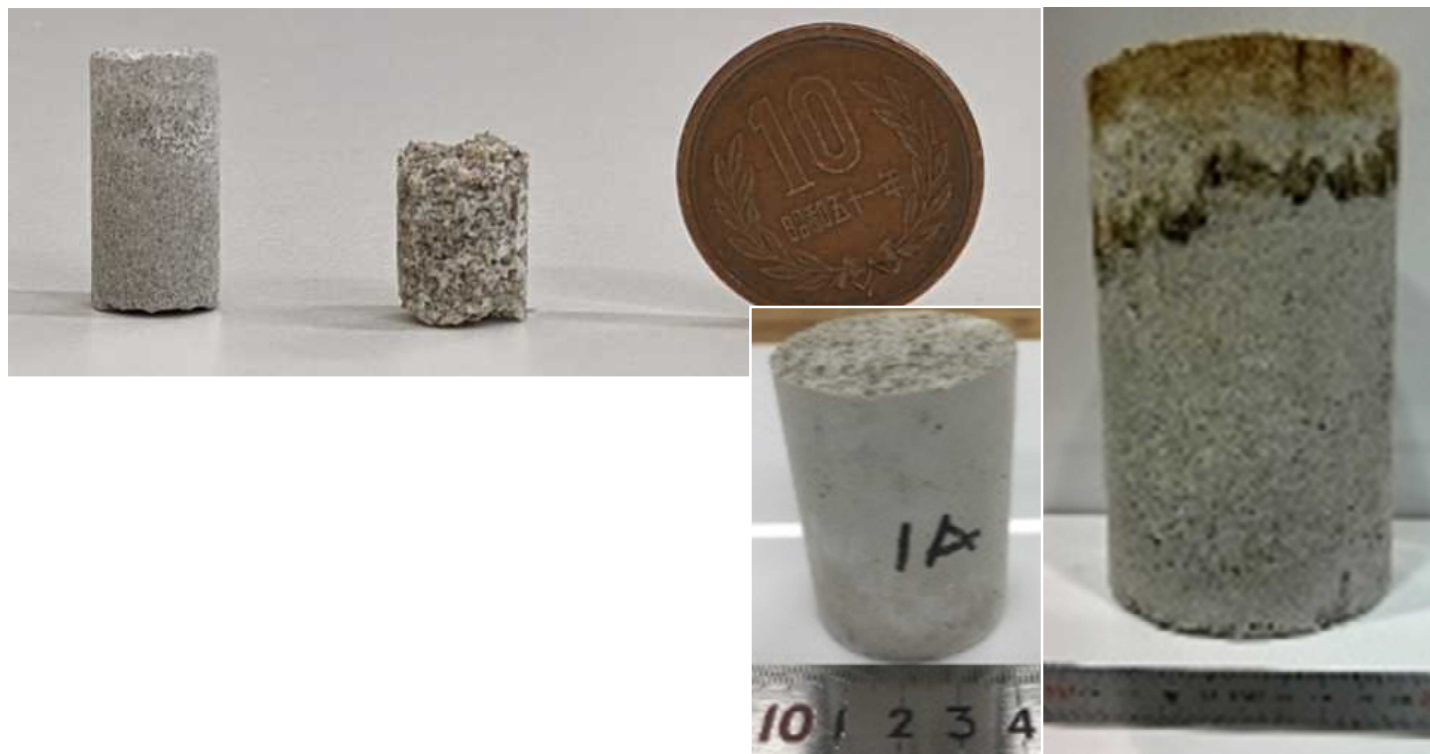
管理は簡便
少量のミスト散布で
表面・内部の反応による
CO₂固定促進を目指す

パイロットプラントの設置に向けて

- 狭い敷地でのオペレーションの精度向上
- 動線イメージなど、実設置計画の立案
- グラブフォークの導入（工場の整備・稼働テスト）
- 手作業方法の効率化
- ミスト装置などの炭酸化促進装置の追加

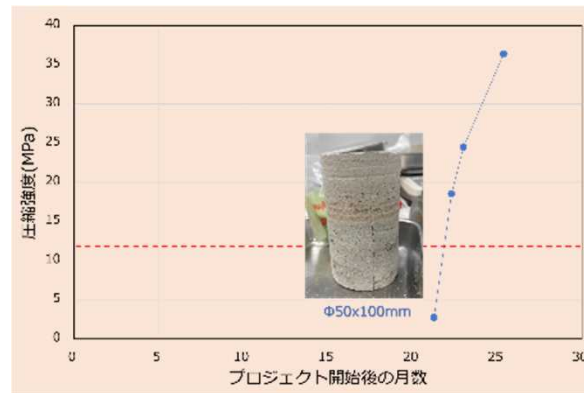
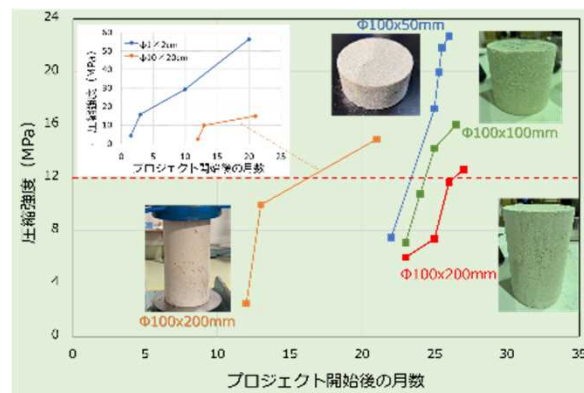
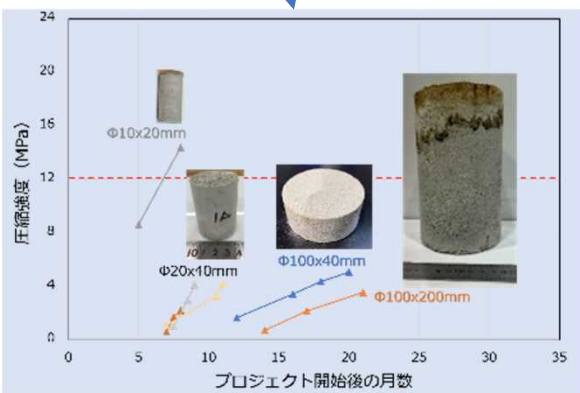
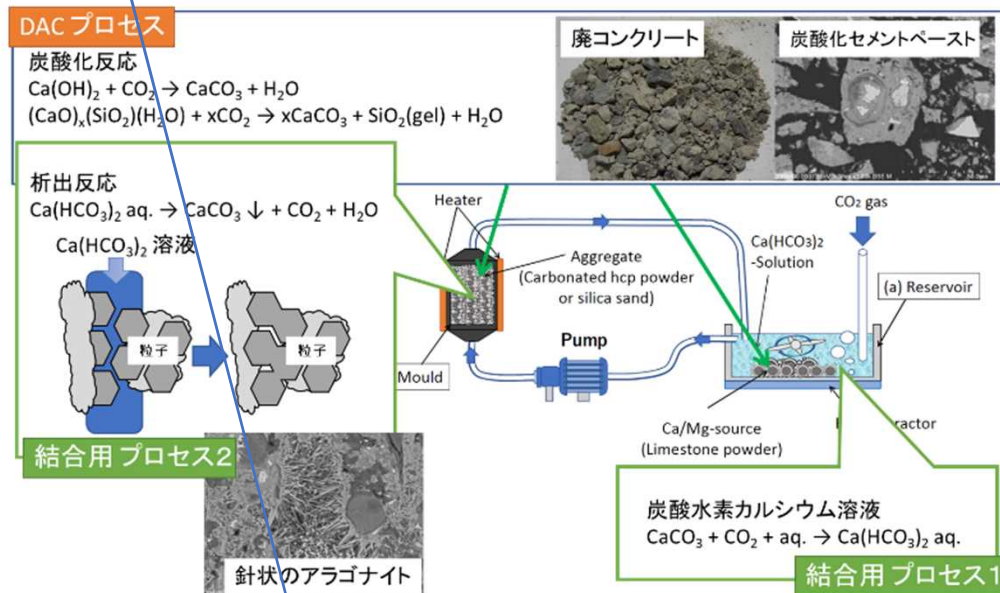


CCC反応制御・安定化製造技術の開発



CCCの各種製造手法の検討

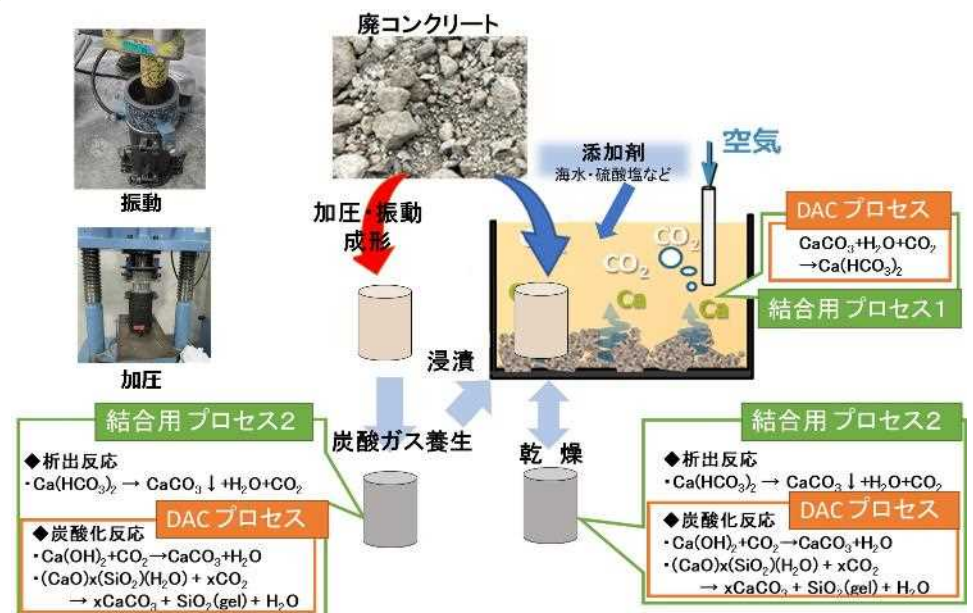
析出法



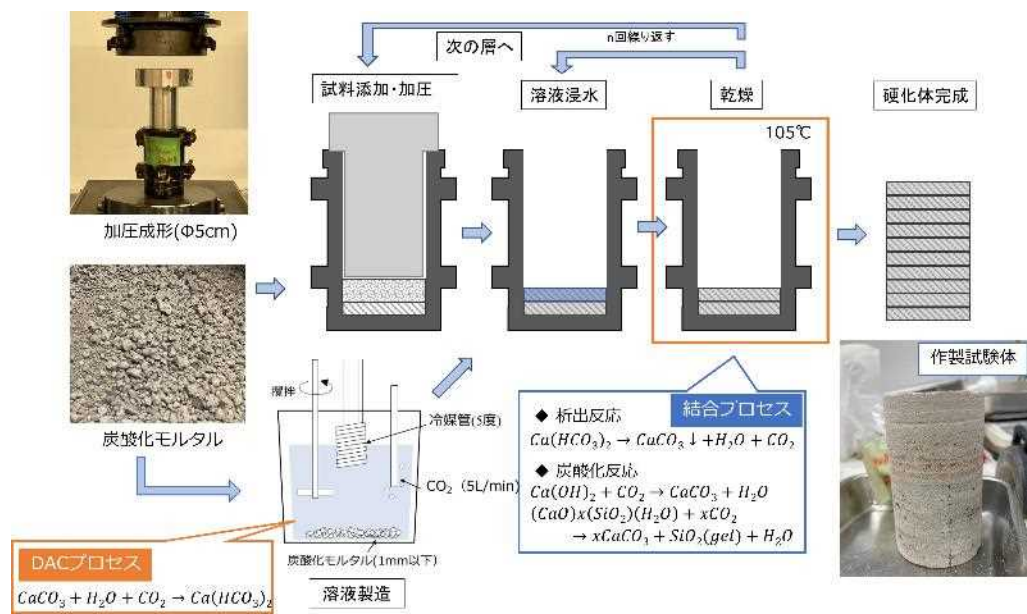
社会実装に向けた課題

- 大型化・高強度化
- 消費エネルギーの削減
- 生産性の向上

加圧法



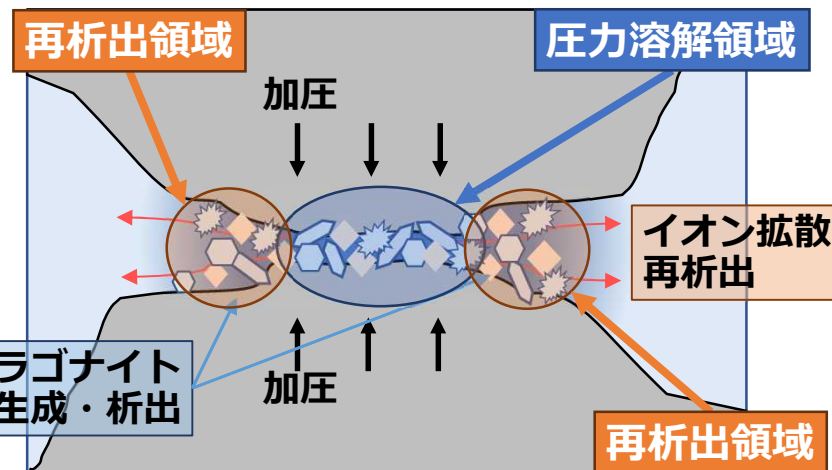
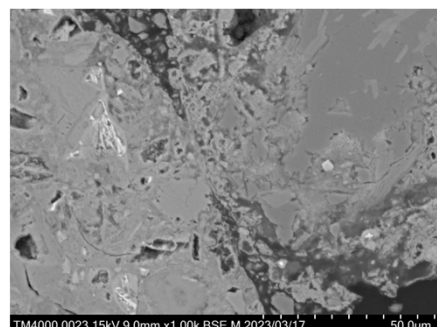
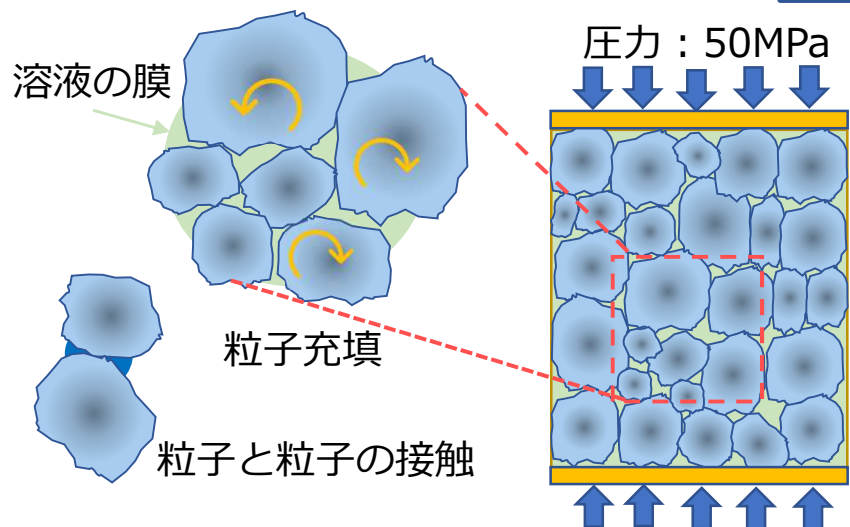
積層法



コールドシンタリング法

強度発現メカニズム

初期加圧 → 粒子充填により実積率の増大 + 粒子間の接触面積の増加
 長期加圧 → Pressure-solutionにより接合面を増やし強度増大に寄与



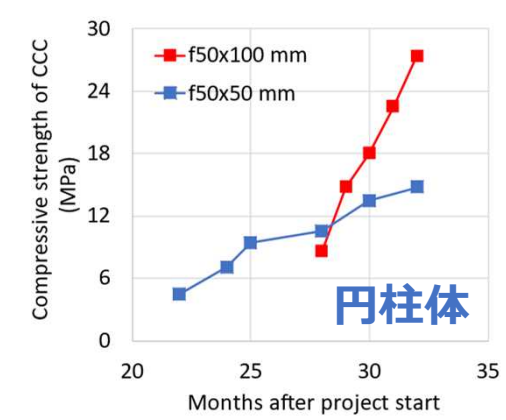
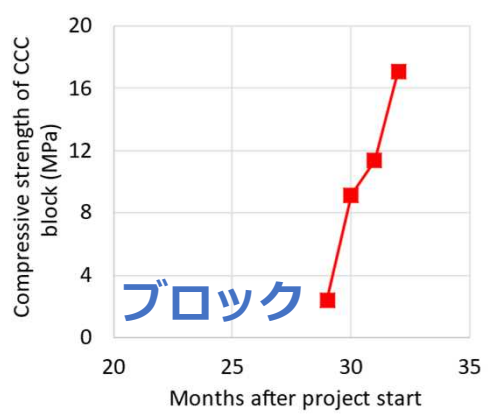
- 粒度分布の最適化
- 加圧成形後のCCCの乾燥
- $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 溶液への浸漬と乾燥 (二次養生)

- CCCの空隙率の削減
- 骨材同士の接触面積の増加
- 加圧成形後のCCC骨格構造の強化
- 骨材界面での炭酸カルシウムの析出
- $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 炭酸カルシウムの更なる析出
- 生じた CO_2 による未炭酸化部分の更なる炭酸化

- ➔ 圧縮強度の増大
- ➔ 緻密化
骨材粒子の結合
- ➔ 圧縮強度の増大
エネルギー消費大

硬化体の高強度化

現在、φ100×200mmで
強度20MPa
 を問題なく確保

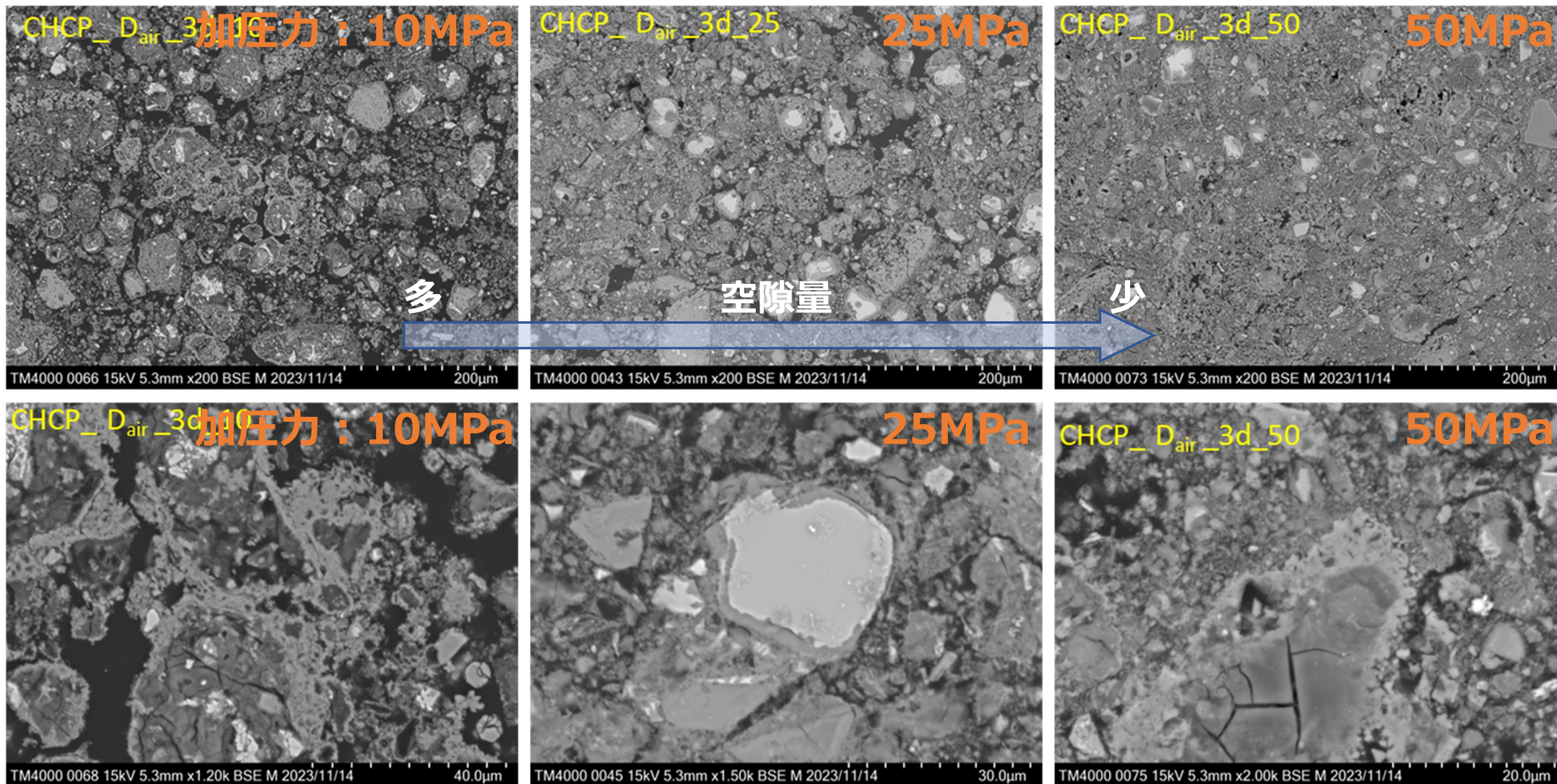


硬化体の大型化



コールドシンタリング法

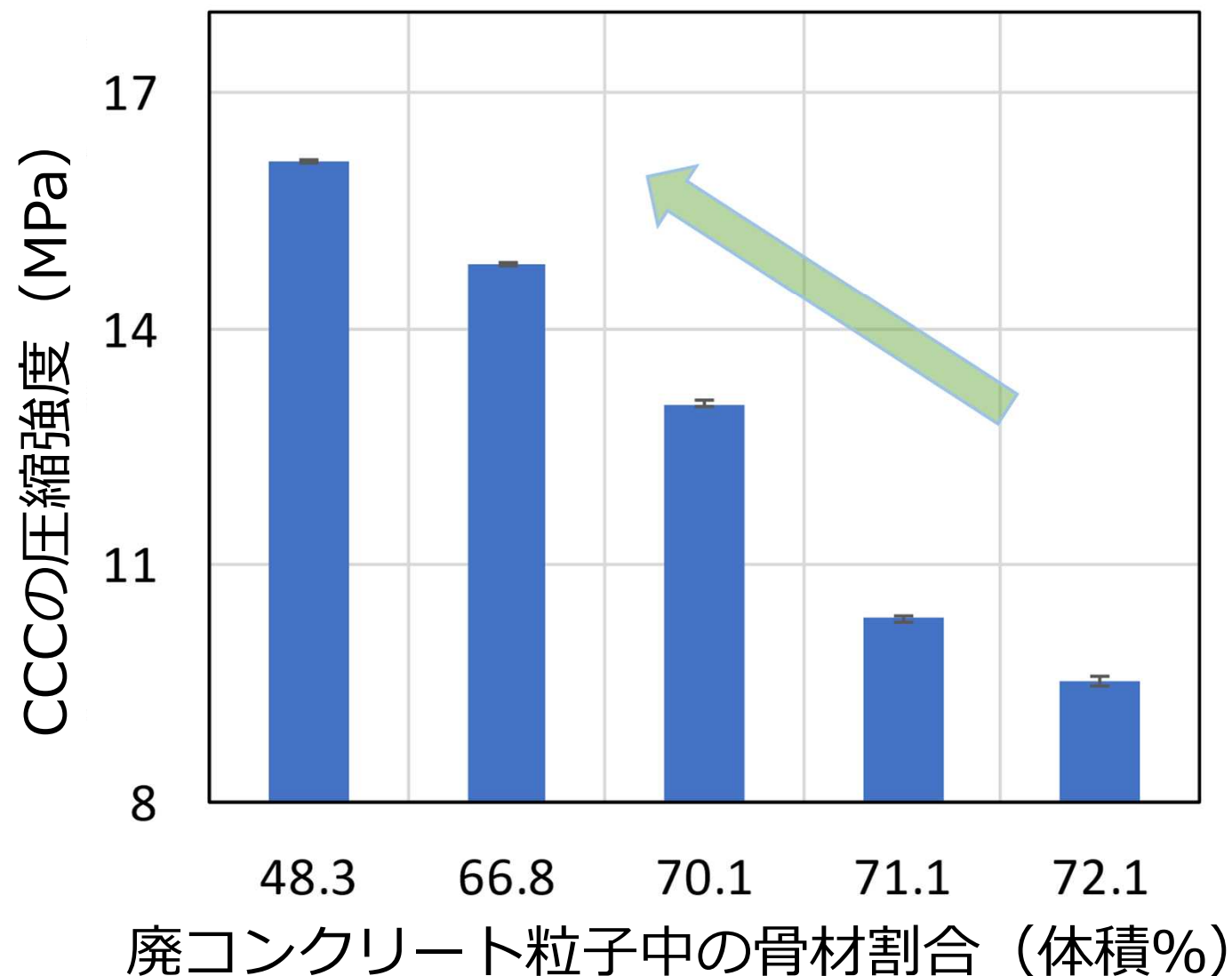
加圧力の影響



■加圧力を増大することで、空隙量が減少し、CCCの圧縮強度は増大

CCC強度に及ぼす原材料の影響の明確化

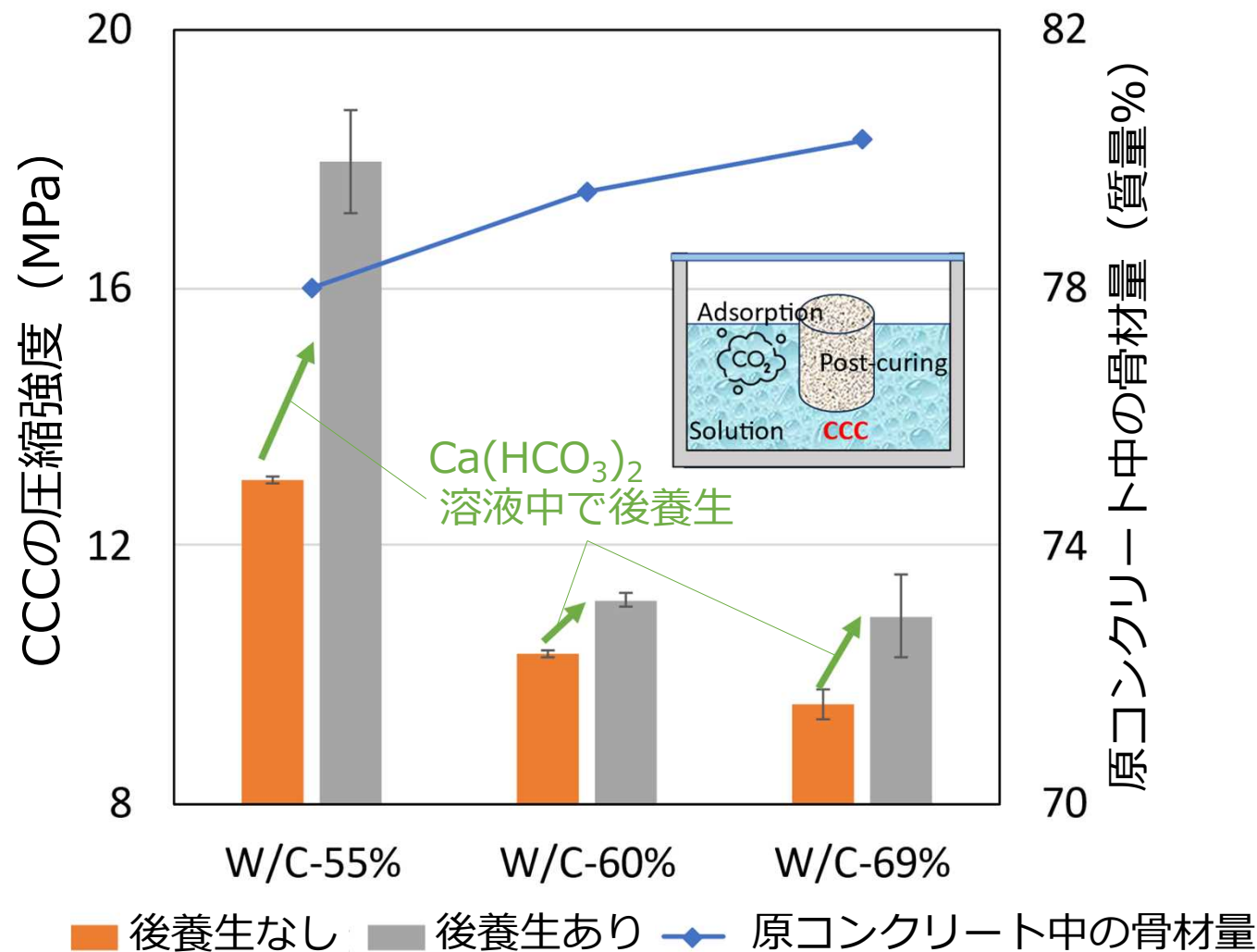
廃コンクリート（原コンクリート）中の骨材量の影響



■ 廃コンクリート中の骨材量が少ないほど ➡ CCCの圧縮強度は高い

CCC強度に及ぼす原材料の影響の明確化

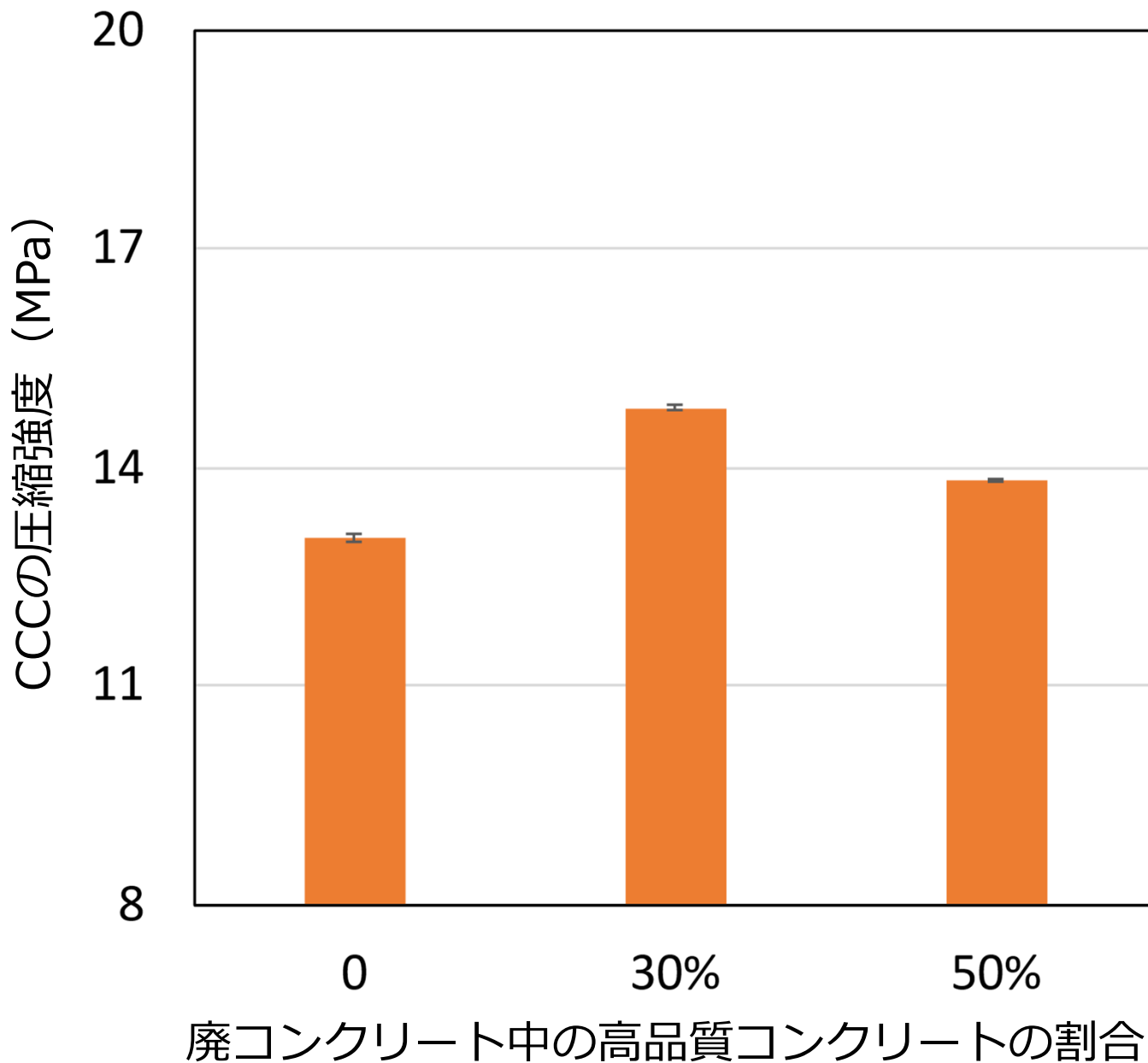
廃コンクリート（原コンクリート）の圧縮強度の影響 CCCの後養生の影響



- 廃コンクリート（原コンクリート）の圧縮強度が高い
 - 後養生を行うことにより、CCCの圧縮強度は増大
- ➡ CCCの圧縮強度は高い
後養生の効果は高い

CCC強度に及ぼす原材料の影響の明確化

廃コンクリートの品質のばらつきへの対応

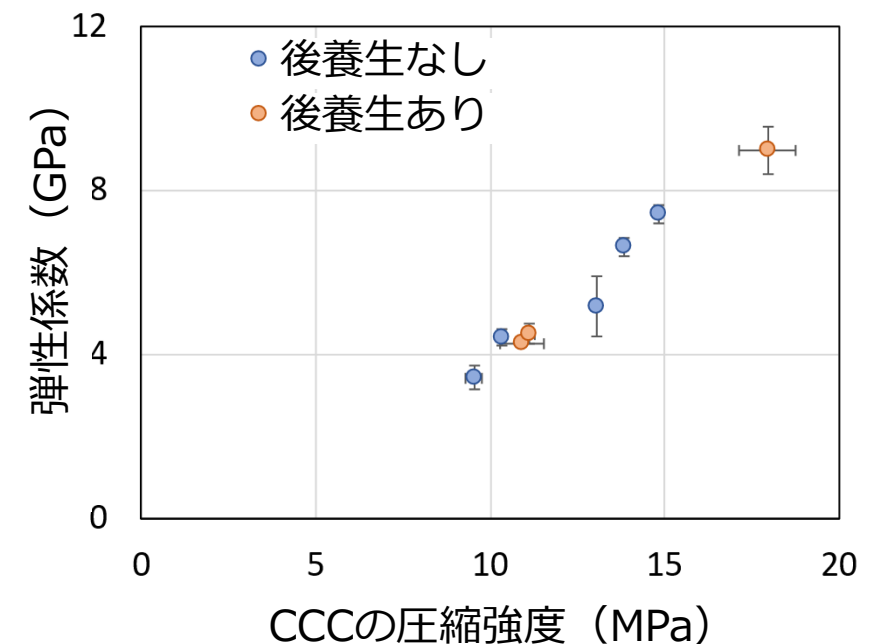


■ 廃コンクリート（原コンクリート）が低品質な場合

➡ 高品質な廃コンクリートと混合することで強度改善

圧縮強度と他の性質との関係

■ 通常のコンクリートと同様に、圧縮強度の管理により、他の性質も管理可能

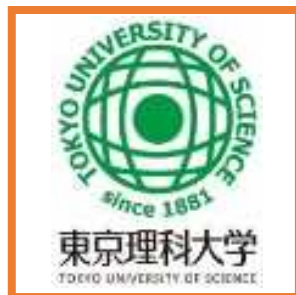
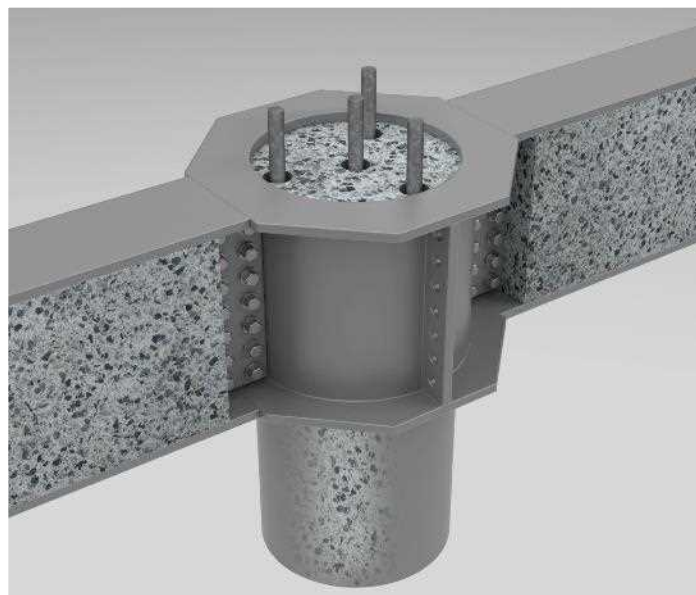


品質の安定したCCCを製造するための実用方策

- 低強度（低品質）の廃コンクリートを原料としてCCCを製造する場合の強度改善策（品質管理）
 - 品質の高い廃コンクリート（選択的に予選別が必要）を30%以上混合
 - 廃コンクリート破砕粒子の最大寸法0.6mm以下
 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 溶液への浸漬と乾燥を繰り返す6回以上
- 廃コンクリート中の原骨材の体積が70%以下であれば、圧縮強度が12MPa以上のCCCを製造可能

CCC部材の製造手法・性能評価法の開発

CCC構造物の設計手法の開発



CCCユニットを用いた構造部材の検討

構造形式	部材形式・想定製造方法	課題	評価
補強CCC造	薄肉鋼管+ 内部PS方式 積層・加圧	接合部 梁等との接合	軸圧縮、曲げ、せん断、 接合部性能
	薄肉鋼管+ 外部PS方式 CS/加圧・乾燥/析出	接合部 梁等との接合 選定	軸圧縮、曲げ、せん断、 接合部性能
壁式造	PSブロック造 CS/加圧・乾燥/析出	PS導入方法	軸圧縮、曲げ、せん断、 面外許容変形性能
	補強ブロック造(在来法) 内部使用：20MPa～ 外部使用：30MPa～ CS/加圧・乾燥/析出	補強材導入方法	軸圧縮、曲げ、せん断、 面外許容変形性能
床部材	積層面部材	作製方法	曲げ、せん断
梁・接合部材	SC(複合)部材	作製方法	曲げ、せん断
蛇籠造	蛇籠		軸圧縮、曲げ、せん断、 面外許容変形性能

数値解析による検証

選定

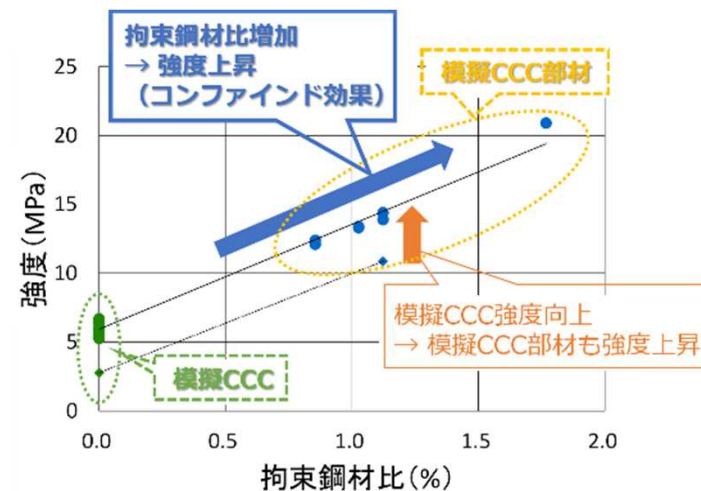
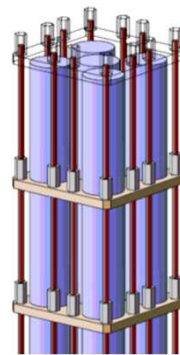
全体的な構造の検討

壁構造としての検討

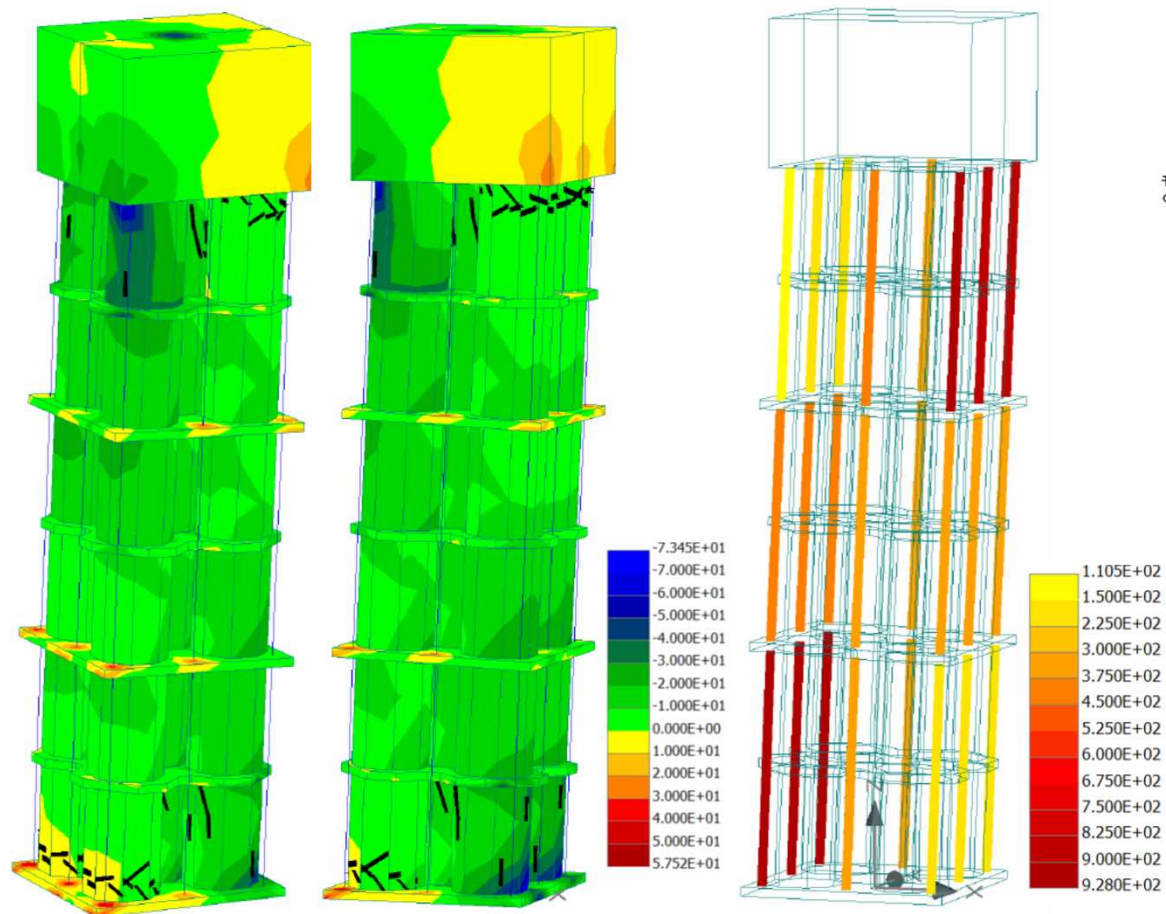
CCCユニットを用いた構造部材の検討

薄肉鋼管 + 外部PS方式

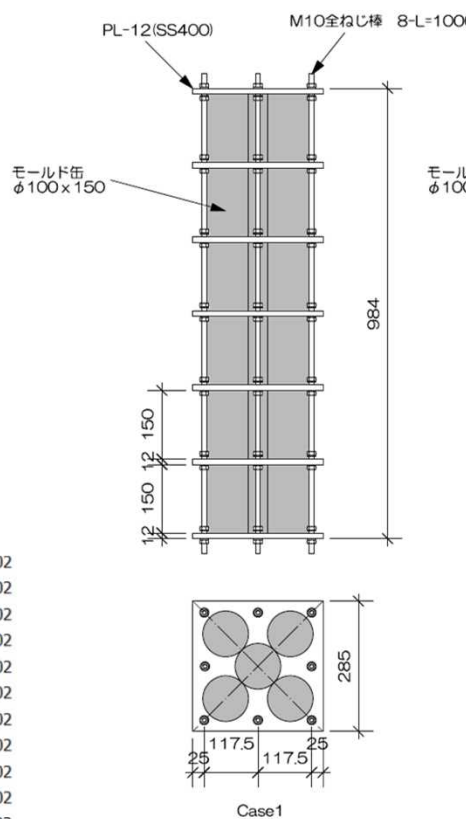
- 薄肉鋼管の拘束により強度向上
- FEM解析により部材性能の検証・最適化
- 模擬CCC部材による部材性能の実証実験



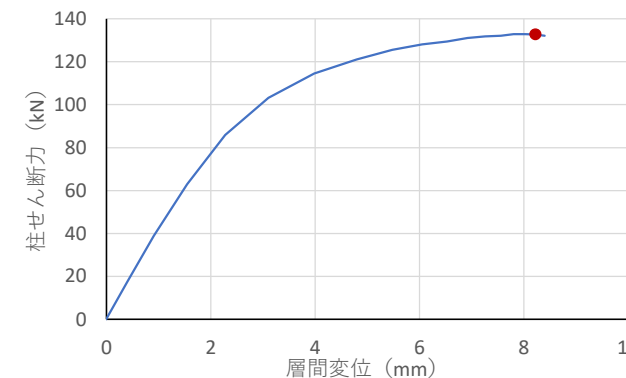
FEM解析



模擬CCC部材による部材性能の実証実験



模擬CCC部材

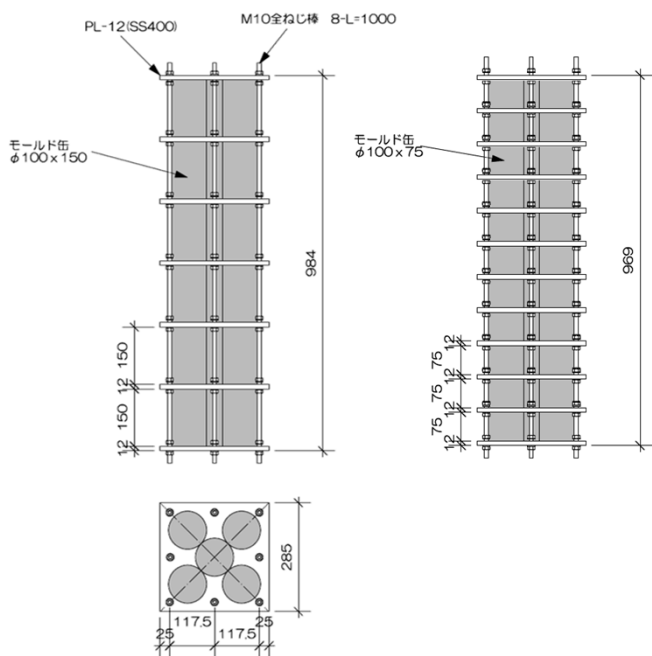


軸力 : 141kN ($0.15\sigma_B$)
 $P_y = 496\text{kN}$ (930N/mm^2)
 緊張力 : 283kN (531N/mm^2)
 → CCC- 7N/mm^2 ($0.30\sigma_B$)

CCCユニットを用いた構造部材の検討

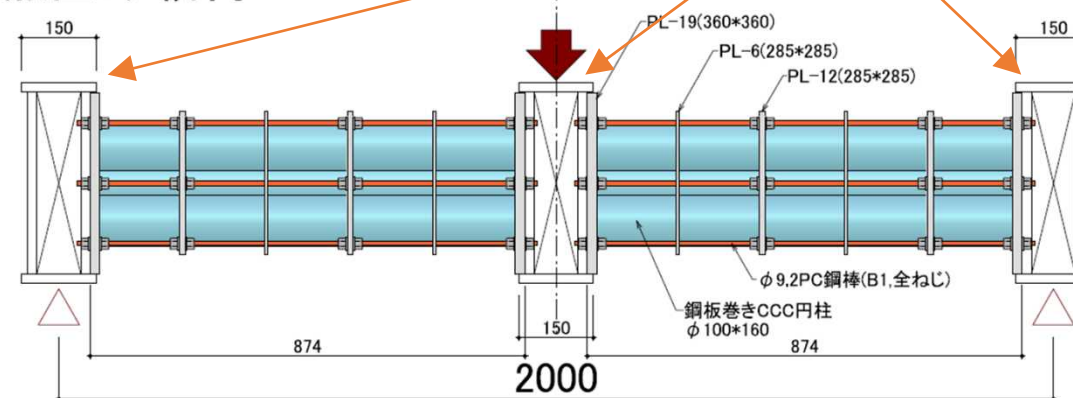
模擬CCC部材・CCC部材の耐力評価

- 製造工程を想定して高さの異なる2ユニットを準備
- 3点曲げ載荷／大野式逆対称曲げせん断載荷



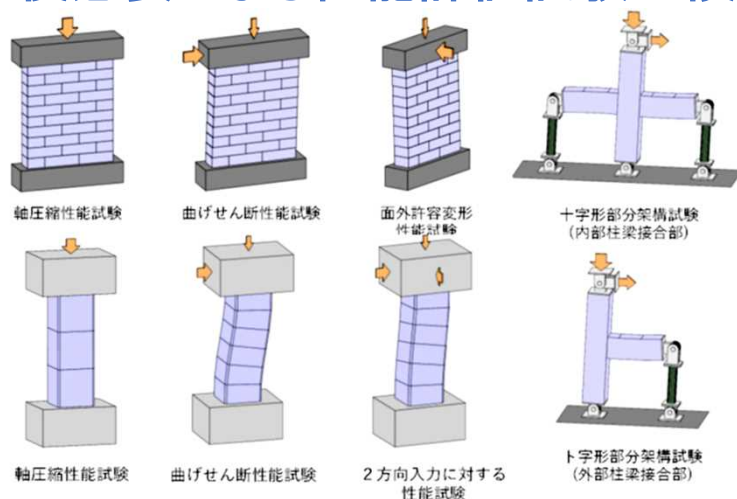
薄肉鋼管・外部PS方式については載荷部などを変更

3点曲げ載荷

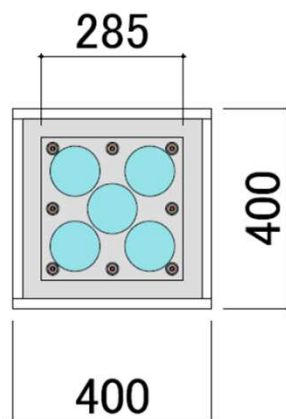
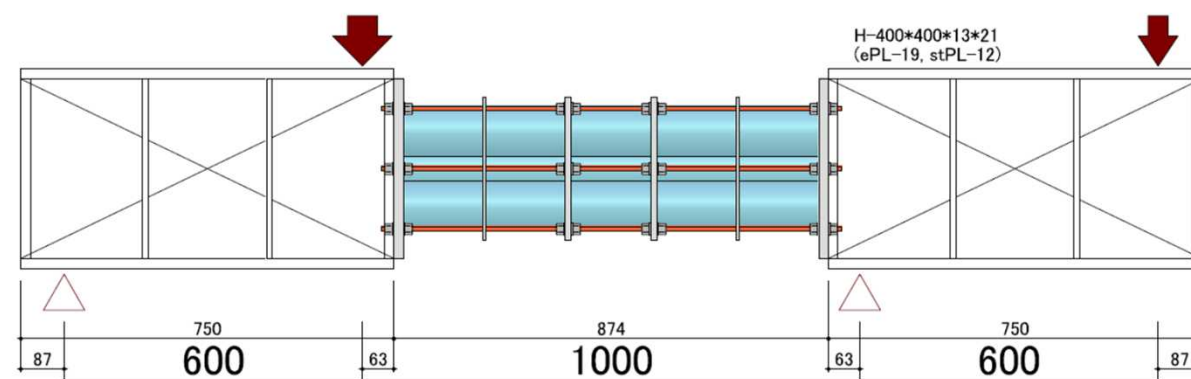


PC緊張力：35kN/本
8本で280kN

今後必要となる性能評価試験の候補



大野式逆対称曲げせん断載荷

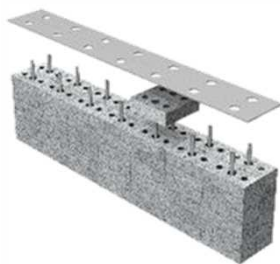


CCCユニットを用いた構造部材の検討

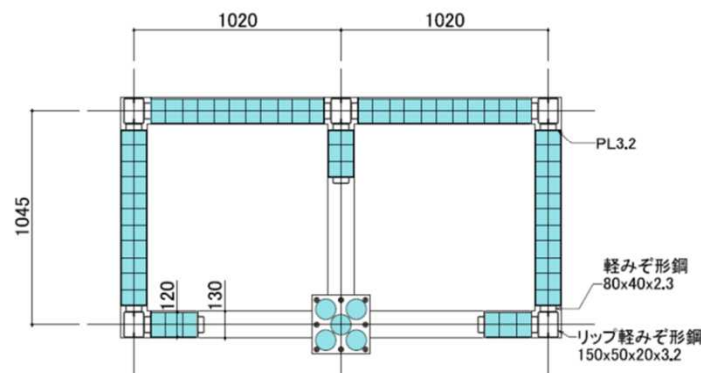
CCC部材を用いた全体架構の検討

- 部材の接合方法
- CCCの最適な活用方法

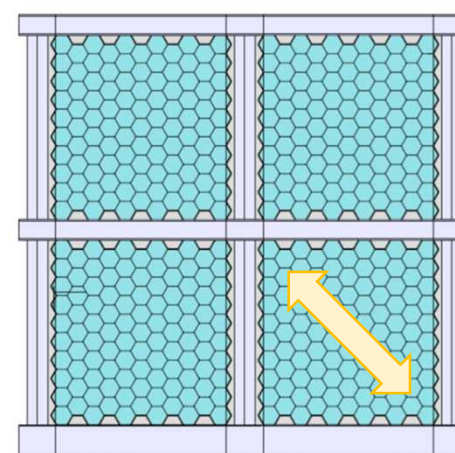
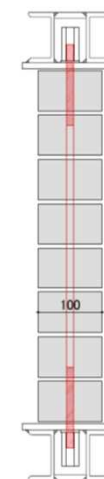
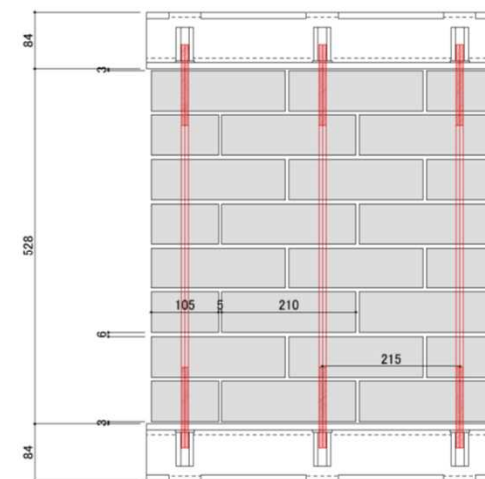
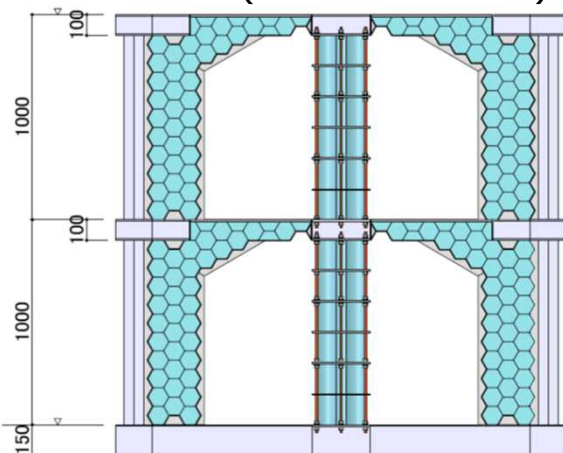
PSブロック造



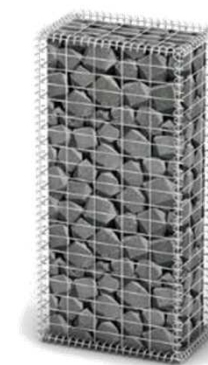
W/C=100%、増粘剤入り
1:3 モルタルブロック



アーチ構造(圧縮力のみ作用)

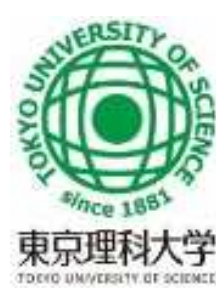
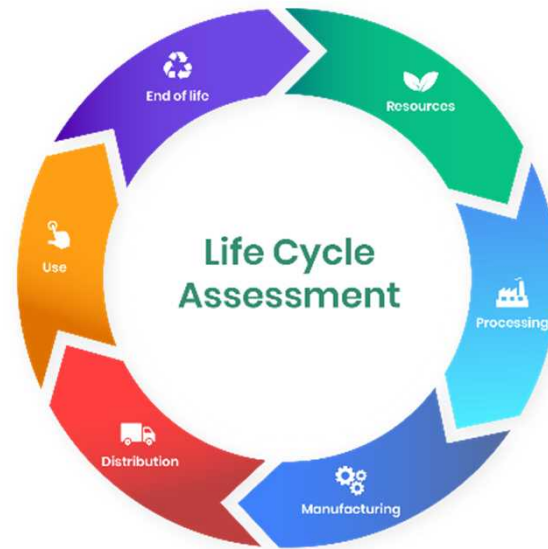


ハニカム積み



蛇籠

C⁴Sの社会実装



資源循環シナリオ設計

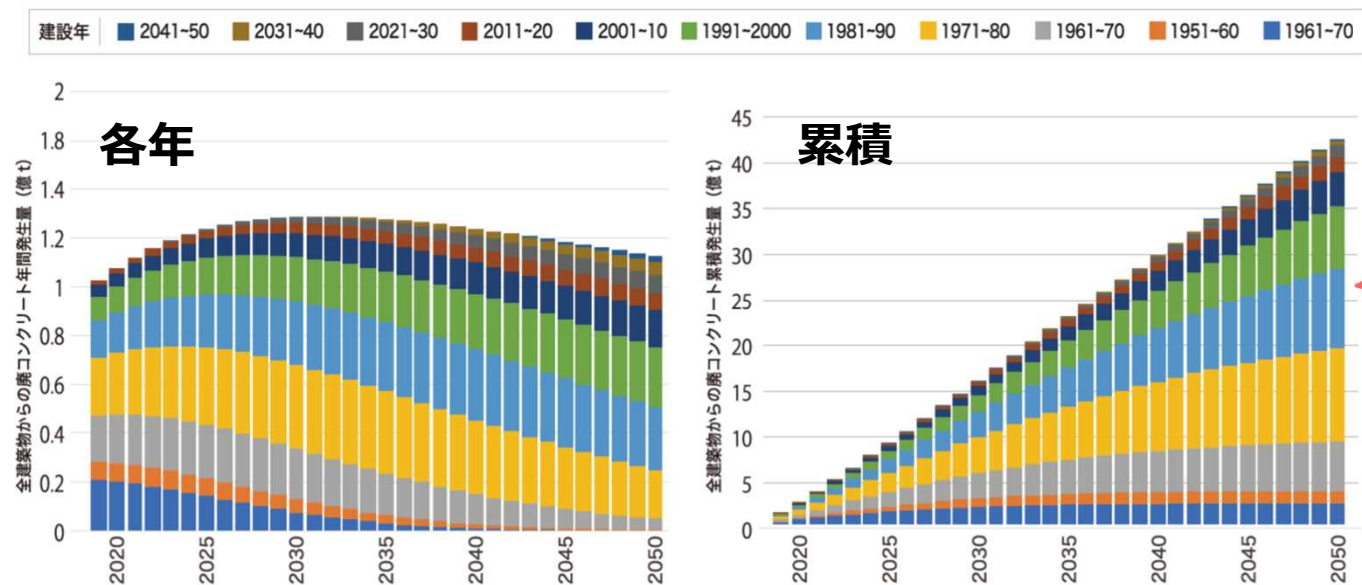
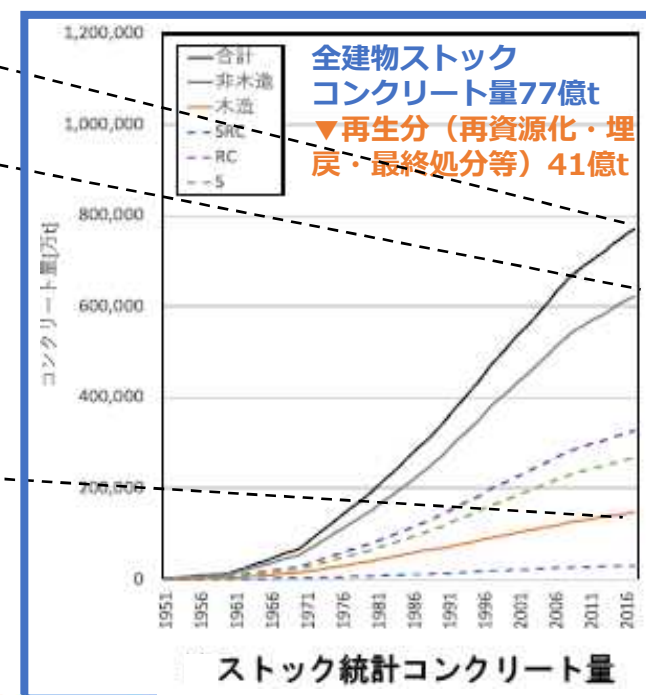
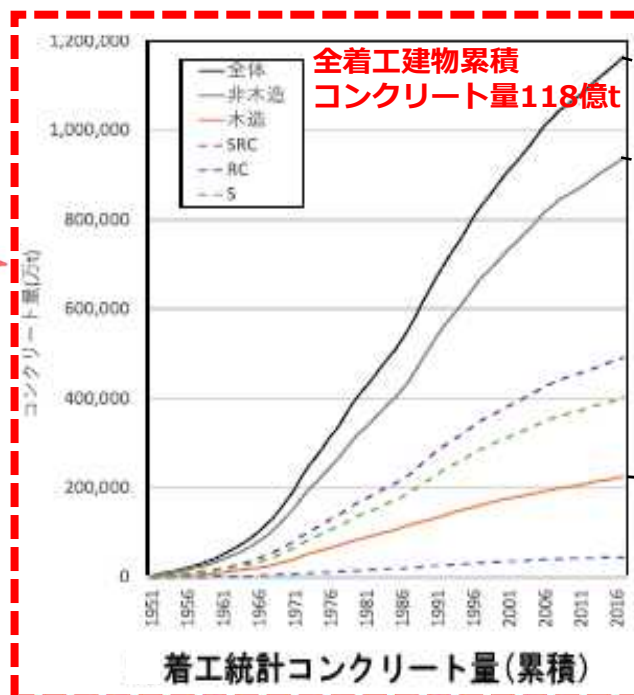
- ①地域性を踏まえた**廃コンクリート発生量**（CCC原材料）に関する調査・推計の実施
- ②効率的な**中間処理場の配置計画**、廃コンクリートの種類・特性・受入条件の整備、新たに必要となる製造システム更新手法提示
- ③CCCの用途（構造種別・部位・製品）と廃コンクリートの排出条件・処理条件を踏まえた**資源循環シナリオの構築**

①CCC原材料の蓄積量・発生量の予測



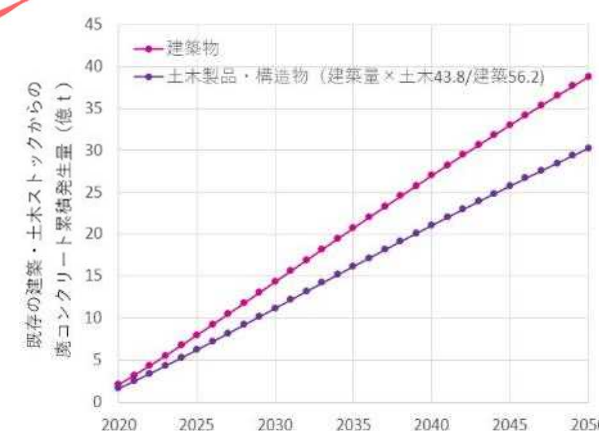
建築着工
Input!

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%）



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)



資源循環シナリオ設計

- ①地域性を踏まえた**廃コンクリート発生量**（CCC原材料）に関する調査・推計の実施
- ②効率的な**中間処理場の配置計画**、廃コンクリートの種類・特性・受入条件の整備、新たに必要となる製造システム更新手法提示
- ③CCCの用途（構造種別・部位・製品）と廃コンクリートの排出条件・処理条件を踏まえた**資源循環シナリオの構築**

② CCC製造を促進する中間処理場の配置計画

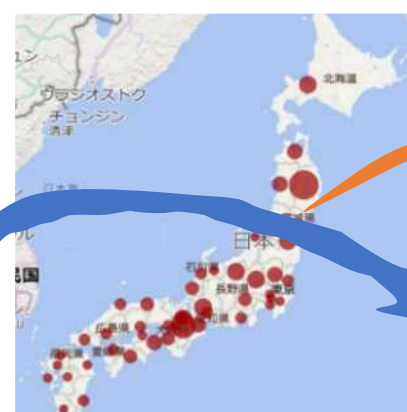
B分類 = 都市 - 専門処理型地域によるCCC発生×製造拠点の選定



都道府県別
中間処理場(N)
マッピング



Y : 中間処理場
相対処理量範囲 (人/施設)



X : 中間処理場
地理的業務範囲 (km²/施設)

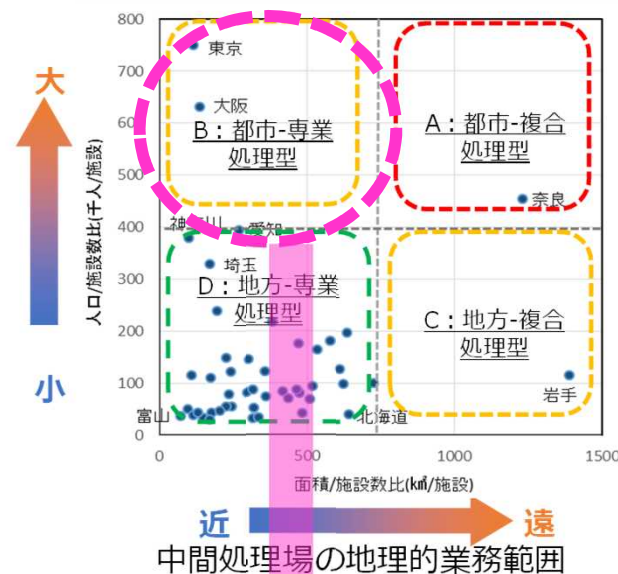


重ね合わせ
可視化

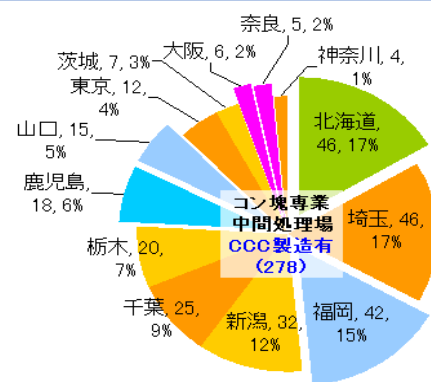
X+Y : 都市～地方の
中間処理分類 (ABCD)

地域特性
4分類化

中間処理場の相対処理量範囲



都道府県別産廃物処理情報（優良認定業者）+コンクリート塊専門中間処理施設（CCC製造拠点）のDB化



CCC製造
拠点候補



施設番号	業区分	処理方法	処理能力										備考		
			コンクリート	砕石	砂	土	その他	その他	その他	その他	その他	その他			
25-9431	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09-303	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
08-1748	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
41-2161	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
42-1892	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
92-0213	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
76-9378	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
92-3163	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
92-0751	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
92-1843	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
23-2138	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17-4891	中間	砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
06-1478	中間	砕砕+圧砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
93-9001	中間	砕砕+切砕+砕砕+砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
06-9212	中間	砕砕+砕砕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

かれき類（専門）

かれき類+陶磁器ガラ

- 成果**
- 2050年までの**都道府県別のコンクリート塊発生量**の推定
 - 都道府県別に**中間処理場の処理能力の過不足状況**の把握
 - 都道府県別に中間処理場の**潜在的処理量**と**物理的な処理範囲**による**4地域分類**の設定
 - 全国の「CCC製造拠点地域」の施設可能数の把握

- 今後の課題**
- 都市計画法・廃掃法・建築基準法における**中間処理場の設置条件等**の把握
 - 廃コンの種類・特性・受入条件に応じた**最適な中間処理システム**、**PCa工場等への製造技術の展開**

建築基準法に関わる制度の検討

① 普通のコンクリートと同等とみなせる場合

- 指定建築材料（建築基準法第37条）
 - JIS A 5308適合品として利用可能
 - 現況告示によって評価し、大臣認定を取得して利用可能
 - 告示を修正して評価し、大臣認定を取得して利用可能

② 普通のコンクリートと類似しているが、同等とはみなされない場合

- コンクリートの定義（JIS A 0203）の範疇
- 指定建築材料として位置づけ
- 告示に「特殊なコンクリート」等として新たに位置づけ評価する必要あり

③ 普通のコンクリートとは異なる（類似とはいえない）場合

- 指定建築材料ではない

CCCの場合：③

■ 設計法・品質管理等の内容について、建築基準法第20条の大臣認定の個別取得が必要

日本建築防災協会「**環境配慮型コンクリート対応検討委員会**」に参画して検討中

- 国土交通省補助事業「建築基準法・建築士法等の円滑な執行体制の確保に関する事業」
- 委員長：野口貴文、委員：兼松学、丸山一平など

実建造物の建設予定（大阪万博での展示建造物）

■ 未来社会ショーケース事業出展

<https://www.expo2025.or.jp/sponsorship/future/#sec1>

→フューチャーライフエクスペリエンスの期間展示13m²に応募

フューチャーライフエクスペリエンス

未来の食・文化・ヘルスケアを中心とした
「未来の暮らし」をテーマとした展示・ステージ



「TEAM EXPOパビリオン」

「未来への行動」をテーマとした
「TEAM EXPO 2025」プログラムを起点とした
展示・ステージ

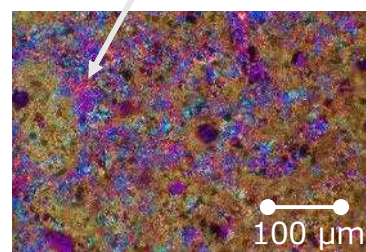


CCC原材料

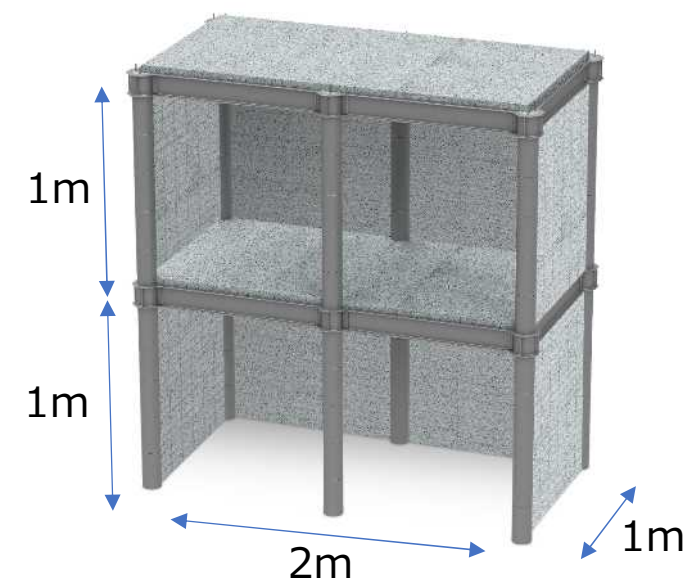


CCCユニット

炭酸カルウムシム（≒CO₂）の析出箇所



CCC中の見えないCO₂の可視化



CCCを用いた建造物
(形状：さらに工夫予定)

ご清聴ありがとうございました。

2050年カーボンニュートラル社会を実現するために、2029年度におけるCCCの社会実装に向けて、検討を進めて参ります。

救え、地球を！

C4Sで！！