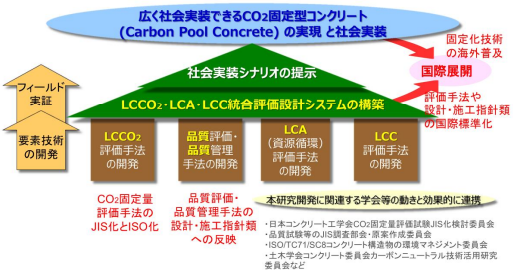
NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026
発表No.：p-07

グリーンイノベーション基金事業／ CO_2を用いたコンクリート等製造技術開発
CARBONPOOLコンクリートのLCCO$_2$・LCA・LCC総合評価設計システムの構築

団体名： (一財)電力中央研究所、(国)東京大学、(公)都立大学、(国研)国環研、(学)明星大学
発表日：2026年7月22日

背景・目的

LCCO₂のみならず、コンクリート構造物の持続可能な整備に必要となる合理的な設計概念の確立を目指して



開発目標・開発項目

研究開発項目	開発目標
2. LCCO₂・LCA・LCC統合評価設計システムの構築	「広く社会実装できるCO₂固定型コンクリートの実現」に必要となるCO₂固定量・品質評価技術の開発とLCCO₂・LCA・LCC統合評価設計システムの構築

研究開発内容	成果の反映先
① CO₂固定量評価手法の開発	CO₂固定量評価手法の学会規準策定（JISおよびISO原案へ反映） ※コンソーシアム横断研究
② 品質評価・品質管理手法の開発	コンソーシアム研究開発項目１のCP材料・コンクリート製造手法の合理化 土木学会・日本建築学会が策定する設計・施工指針類への反映
③ LCA（材料資源）評価手法の開発	CO₂固定型コンクリートのCO₂削減効果の適切な評価方法の確立
④ LCC評価手法の開発	CO₂固定型コンクリートのコスト面、特にLCCでの優位性の明示
⑤ LCCO₂・LCA・LCC統合評価設計システムおよび社会実装シナリオの検討	・統合評価設計システムの構築 ・社会実装シナリオの提示 ・カーボンクレジットの公平性を担保するグローバルな評価基準の提案

実施内容

研究開発内容	直近のマイルストーン	これまでの開発進捗
① CO₂固定量評価手法の開発	後続分析手法①のJIS素案	・従来型TG、湿式分析法のISO原案をCD consultation段階に移行させた。 ・CO₂の$^{13}C/^{12}C$をTG-TOF-MSで化石燃料由来か否かを評価可能にした。 ・大容量TGで繰り返し性を高めた固定量測定を可能にした。 ・固定量現場測定法、供用中固定量推定法の概念を構築した。
② 品質評価・品質管理手法の開発	CO2固定骨材・混和材の品質評価手法の提案	・CP微粉末(CSP)の製造条件の合理化策とコンクリート添加時の疑凝結抑制策を提案した。・一般再生骨材に比べてCP骨材の方が舗装コンクリートの力学特性を高められることを示した。・CSPと高炉スラグの併用、20%CO₂での養生で建築用パネルを高強度化できることを示した。・CP細骨材の半分を砂砂置換、変性ロジン系AE剤の使用で耐凍結融解性能を高められる。・CP骨材を使用したコンクリート中の鉄筋腐食速度は一般環境下では通常レベルである。
③ LCA（材料資源）評価手法の開発	ある条件下のCO₂固定型コンクリートのCO₂削減効果の評価方法の提示	・研究開発項目1の協力の下、滋賀県モデルを対象にエネルギー収支関連情報入手した。・エネルギー(CO₂)収支評価シートを作成し、製造段階における改善点（消費電力）を抽出した。・川崎地区のCP骨材製造装置ドラム内加圧方式が消費エネルギーを抑制できることが分かった。
④ LCC評価手法の開発	カーボンクレジットを含む道路舗装のLCC評価モデルの提示	・コスト収支評価シートを作成し、製造段階における改善点（設備導入費）を抽出した。 ・ロジシット等の情報からCO₂削減量と固定量に各々CO₂-トン当たり2千円、2万円を割り当てることにした。
⑤ LCCO₂, LCA, LCC統合評価設計システムおよび社会実装シナリオの検討	CPコンクリートを対象とした多目的最適解導出手法の適用と改良	・供用中のCO₂固定量推定方法概念提示した(LCCO₂)。 ・エネルギー(CO₂)収支、LCCOの金銭的価値化の概念を提示し(LCA)、LCCと合算することで1指標化し、統合評価手法の概念を提案した。

主要な成果1）

①　CO_2固定量評価手法の開発

＊CO_2固定量評価手法に関するJIS原案作成作業およびISO規格化

日本コンクリート工学会内設置委員会にて、2025年10月にJIS原案を規格協会に提出（原案作成委員会に参加し、精度確保に必要な留意点を提示、原案に組み入れた。また、共通試験に参画し、手順妥当性評価に協力した。）

ISO/TC71/SC8/WG9 Convenorとして原案作成を主導した。第30回TC71総会にSC8/WG9主査として参加し、WG-原稿をCD consultationに進める承認を受けた。
（東大野口教授はSC8委員長として参加）

JIS A 1016
コンクリート及びコンクリート構成材料に固定化した二酸化炭素量

第一部：通則
第二部：酸分解-逆滴定法（湿式分析）
第六部：熱分解-重量測定法（TG）
（以上は完成、最終審議待ち）

以下を追加、原案作成委員会で審議中
第三部：酸分解-ガス容量法
第四部：酸分解-電量法（クーロメータ）
第五部：酸分解-赤外線吸収法（TOC計）
第七部：熱分解-赤外線吸収法（TOC計）

ISO 21282
Determination of mass of carbon dioxide sequestrated in concrete and concrete constituents

Part 1 : General principles
Part 2 : Acid decomposition and back titration method
Part 3 : Thermogravimetry

WG原稿を2025年10月までに作成
⇒原案をSC8の原案とするための意見収集段階（ISOシステム上での意見収集）

主要な成果2）

①-1　CO_2起源の分離評価による信頼性の向上

＊熱分解ガス質量分析法（TG-TOFMS、簡易手法）のバイオマス燃料由来のCO_2分析への適用性を検証するため、装置を導入して試験を開始した。CP製品の価値管理に使用できる可能性を得た。

表　各材料のCO_2起源の評価

試料	$^{13}C/^{12}C$比率（変動係数）	$^{14}C/^{12}C$比率（変動係数）
$CaCO_3$試薬 (N=5)	1.25%（0.10%）	0.46%（0.04%）
OPCペースト-7日炭酸化(N=4)	1.09%（0.06%）	0.45%（0.05%）
CP粗骨材(石灰石由来)-固定処理前 (N=3)	1.24%（0.02%）	0.43%（0.00%）
CP粗骨材バイオマス揮ガスCO₂固定後 (N=3)	1.22%（0.00%）	0.43%（0.00%）

写真　使用したTG-TOFMS（左部：TOFMS、右部：TG）

石灰石、大気中、バイオマス発電所排ガス中のCO_2の$^{13}C/^{12}C$≒1.24‰程度である。化石燃料由来の排ガス中のCO_2の$^{13}C/^{12}C$値は同値に比べて低くなるとされるため（文献情報）、上記OPCペーストの炭酸化で使用したCO_2ボンベのCO_2は石油精製施設等の化石燃料由来である可能性が高い。

主要な成果3）

①-2　大型サンプルを対象としたCO_2固定量評価手法の開発

＊大容量熱重量装置(既製品としての熱天秤、簡易手法)としての適用性は高い。

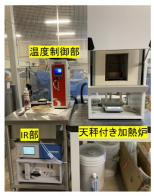


写真　大容量熱分析装置
市販の天秤付き加熱炉とIRを組み合わせた独自装置

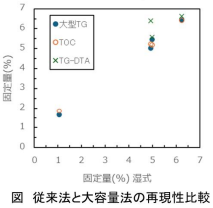


図　従来法と大容量法の再現性比較
従来型TGに比べて大容量TGの方が湿式分析データに対して良好な相関を示す

・室温⇒10℃/分⇒550℃（5時間保持）⇒850℃（10時間保持）、両温度間での質量差分を評価
・分析試料量を多くすること（粗粉砕、1kg程度）でサンプリングエラーを低減

主要な成果4）

①-3　供用中のCO₂固定量評価・推定手法の開発

＊供用中固定量推定方法の概念を取りまとめた。

セメント水和物の炭酸化モデル（完全炭酸化）

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow Ca(CO_3) + H_2O \quad (1)$$

$$CaO_xSiO_2H_2O_z + xCO_2 \rightarrow xCa(CO_3) + ySiO_2(H_2O)_z + (z-y)H_2O \quad (2)$$

入力値
・配合（単位セメント量、空隙量の把握）
・表面積、比表面積（CO_2接触割合、浸透深さ）
・供用期間（CO_2浸透量、固定量）
・炭酸化速度（CO_2固定速度）
・供用環境（CO_2浸透量、固定量）

2010年～2070年の道路用コンクリート建設量の将来予測を前提として、単位セメント量413kg/m³、単位水量165kg/m³等として一義的な配合を設定、骨材全量をCP骨材として供用中のCO_2固定量推定値、解体ガラの保管時CO_2固定量推定値を合算した。

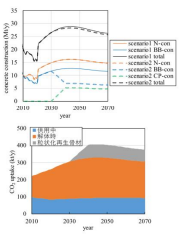
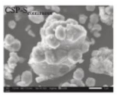


図　道路用コンクリート量予測値とCO_2固定総量推定値

主要な成果5）

②-1　製造原料の品質管理手法の開発

＊ CP微粉末の品質を一定にし、エネルギー収支上合理的な製造条件を提示



CSPのSEM画像

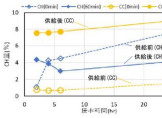


図1　CO_2バブリング水の接触時間と水酸化カルシウム(CH)と炭酸カルシウム(CC)量

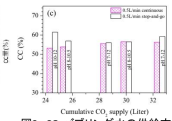


図2　CO_2バブリング水の供給方法(一定流量および間欠供給)と炭酸カルシウム(CC)量

炭酸化スラッジ粉末（CSP）の反応性向上の可能性を検討するため，セメントの接水時間の異なるスラッジ水に対してCO_2バブリングを行い、得られたCSPの活性度指数を評価した。
・スラッジ水を長時間貯蔵した方が水酸化カルシウム(CH)量が増大し、CO_2バブリング後の炭酸カルシウム(CC)生成量が増大するため（図1）、実装時はCO_2バブリングを開始すれば良いことが分かった。
・液相のpH上昇後にCO_2を間欠バブリングする方がCO_2供給量に対するCCの生成効率が高い(図2)。

主要な成果6）

②-2　舗装用CARBON POOLコンクリートの品質管理手法の開発

＊品質管理手法として粒状化再生骨材のCO_2固定量を管理指標とすることを提案

RG100%+CSP の 割 裂 面 で RG骨材も一緒に割裂
⇒モルタル成分との接着性が向上　⇒耐力向上

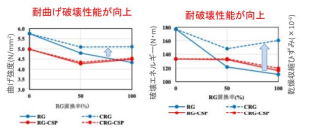


図　曲げ強度と破壊エネルギーの比較
RG：再生骨材、CRG：CP骨材、CSP：炭酸化スラッジ粉末（CP混和材）

CP粗骨材を用いた舗装用CPコンクリートの力学特性（圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、破壊エネルギー）、体積安定性（乾燥収縮ひずみ）とCO₂固定量の関係を評価した。
⇒力学特性と粒状化CP粗骨材のCO_2固定量の間に良好な相関が認められ、固定量を高めることで曲げ強度と破壊エネルギーを高められることが分かった。
（図1：粒状化再生粗骨材(RG)にCO_2を固定(CRG)することで舗装用コンクリートの力学的特性が向上(青実線→青破線)）

主要な成果7）

②-3　建築用CARBON POOLコンクリートの品質管理手法の開発

＊CP材料を使用したCPコンクリートを高濃度CO_2環境下で養生することを提案

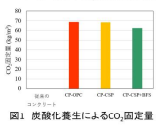


図1　炭酸化養生によるCO₂固定量

・**セメントの20%を炭酸化スラッジ(CSP)で置換**したペースト硬化体を**高濃度CO_2環境下で養生し、CO_2固定量62.3~68.6（kg/m³、コンクリート換算）、圧縮強度30MPa**を確保（図1）

・**高炉スラグ微粉末をCSPと併用**することで圧縮強度をさらに**3~4MPa程度増大**（図2）

・残存した未反応セメントの水和反応により、気中養生でも**材齢28日で40MPa前後まで増大**

⇒炭酸化スラッジ微粉末を使用した建築用ハーフプレキャスト部材は**製品工場における炭酸化養生を行うことが好ましい**。また**高炉スラグ微粉末を併用することで強度の増進が可能である**。炭酸化養生後も未反応セメントが残存すると**供用期間中もさらなる強度発現と大気下での炭酸化によるCO_2固定が見込まれる**ため、特に**ライフサイクルスパンの評価（LCCO₂）に向けてこの供用中のCO_2固定量を観測する必要がある**。

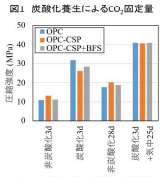


図2　炭酸化養生前後の圧縮強度

主要な成果8）

②-4　土木用CARBON POOLコンクリートの品質管理手法の開発

＊ペースト部位の緻密化策と空気量の確保と分散策を提案

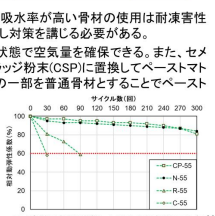
配合 (kg/m³)

水	セメント	高炉スラグ	スラッジ粉末	細骨材	炭酸化再生細骨材	粗骨材	炭酸化再生粗骨材
175	76	178	64	397	346	0	842

再生骨材および炭酸化再生骨材（CP骨材）のような吸水率が高い骨材の使用は耐凍害性能を著しく低下させることが知られており、使用に際し対策を講じる必要がある。
⇒変性ロジン系AE剤を使用することで適切な分散状態で空気量を確保できる。また、セメントの一部を高炉スラグ微粉末および炭酸化スラッジ粉末(CSP)に置換してペーストマトリックスの微細構造を緻密化させること、細骨材の一部を普通骨材とすることでペースト部位の緻密化を図ることができた。

表　試験に用いた試験体名称と配合、空気量、気泡間隔係数

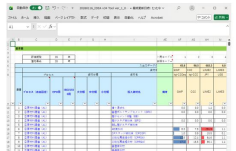
配合名	配合の特徴	空気量(%)	気泡間隔係数(μm)
N-55	普通骨材	4.8	312
R-55	再生骨材	5.5	180
C-55	炭酸化再生骨材	5.7	206
CP-55	炭酸化再生骨材+炭酸化ス	5.2	152



主要な成果9）

③　環境影響評価(LCA)手法の開発

＊バイオマス発電所排ガスの直接利用による環境負荷低減策を提示



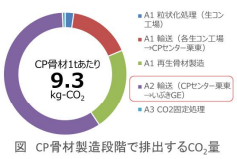


図　CP骨材製造段階で排出するCO_2量

研究開発項目１が開発を進める諸地域のうち、バイオマス発電所、CP骨材製造工場、生コン工場がそれぞれ数10km離れた地点に存在し、LCA上有利と判断した滋賀県内をモデル地区としてCP骨材製造工程におけるCO_2収支を評価するための基礎データを取得し、エクセル上で試算した。

主要な成果10）

④　ライフサイクルコスト(LCC)評価手法の開発

＊ CP材料を製造する工程におけるコスト抑制が必要なことを提示

LCAの検討と同じ滋賀県内をモデル地区としてCP骨材製造工程、輸送等各段階におけるLCCを評価するための基礎データを取得した。また、カーボンクレジットに関する情報を調査し、CO_2削減量とCO_2固定量に金銭的価値としてCO_2-トン当たり各々2千円、2万円[注]を割り当てた。
注）J-クレジット2023年5月入札販売実績(1,551～3,246円、2030年には欧米並みの8,000～20,000円との推定あり)、Jブルークレジットの2021～2023年度取引実績(49,111～78,063円)を参考に過大評価しない範囲、CO_2固定に付加価値を付けて設定

残コンクリートの処分費として施行者が1万円/トン程度支払う方針が各地区の生コン協組で示されているため、製造費用に繰り込んだ。そして、CPコンクリート製造時にセメントを高炉スラグ等の混和材に可能な限り多く置き換え、CO_2削減量を確保した上でCP骨材およびCPスラッジ粉末を使用するケース毎にCO_2固定量を設定し、CPコンクリート（部材）を製造する段階におけるコストを試算した。CO_2固定装置導入費用がコスト収支に大きく影響することを把握した。これを受け、研究開発項目１ではCP骨材製造用装置の合理化策の検討を進めた。

主要な成果11）

⑤　LCCO₂・LCA・LCC統合評価設計システムの構築

＊ CO_2の金銭価値の前提条件付きで統合評価設計システムの概念を提示

・LCA評価におけるCP骨材、CPスラッジ粉末、そしてCPコンクリート(部材)を製造する段階からCPコンクリートを解体する段階までの各段階でのCO_2収支量、および供用段階から解体段階までの各段階におけるCO_2固定量(LCCO₂、成果5の概念で評価手法を構築予定)を金銭的価値（CO_2-トン当たり2千円～2万円、根拠は前述）に置き換え、同段階におけるコストと合算する手法を提案する。

・LCCO₂評価手法は成果5の概念に従うが、実現象との比較、検証が必要なため、試験体を対象としたCO_2固定量モニタリングを2024年度に着手した。なお、鉄筋腐食速度の管理に関しては従来の再生骨材を使用したコンクリートと同等であり、使用環境条件に留意すべきことも分かった。

今後の展開

①CO_2固定量評価手法の開発
・各種CP材料を対象とした大容量法によるデータ取得
・試料サンプリング方法の相違と評価値の関係性を評価
・提案手法ATR-FTIRの現場測定装置の開発
・提案評価原理に基づく評価ツール構築と検証データの取得
②品質評価・品質管理手法の開発
・CP材料製造現場でのロット内撹拌とサンプリング方法の検討
・生コン工場におけるCP材料の事前調整方法の検討
・強度、耐久性確保を目的としたCP材料使用量の見極め
・道路用CPコンクリートの耐摩耗性能の評価等の実施
③環境影響評価（LCA）手法の開発
・複数の試験施工、モデル地区における関連情報の収集
・提案LCA評価ツールへのデータ入力とモデル地区間での比較
④ライフサイクルコスト（LCC）評価手法の開発
・複数の試験施工、モデル地区における関連情報の収集
・提案LCC評価ツールへのデータ入力とモデル地区間での比較
・更新されたクレジット関連情報の入手と評価ツールの更新
⑤LCCO₂・LCA・LCC総合評価設計システムの構築
・他分野における多目的最適解導出手法に関する情報を整理し、金銭価値よりもCO_2固定に対する価値観に重みづけをすべきか等の検討を行う
・複数の試験施工、モデル地区で得られるデータ、情報を基に感度解析を実施

連絡先：(一財)電力中央研究所　　山本　武志
MAIL：t-yama@criepi.denken.or.jp