

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo.B2-2-05

グリーンイノベーション基金事業/CO₂を用いたコン
クリート等製造技術開発/CO₂排出削減・固定量最
大化コンクリートの品質管理・固定量評価手法に関
する技術開発/CARBONPOOLコンクリートのLCCO₂・
LCA・LCC総合評価設計システムの構築

発表：2026年7月22日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

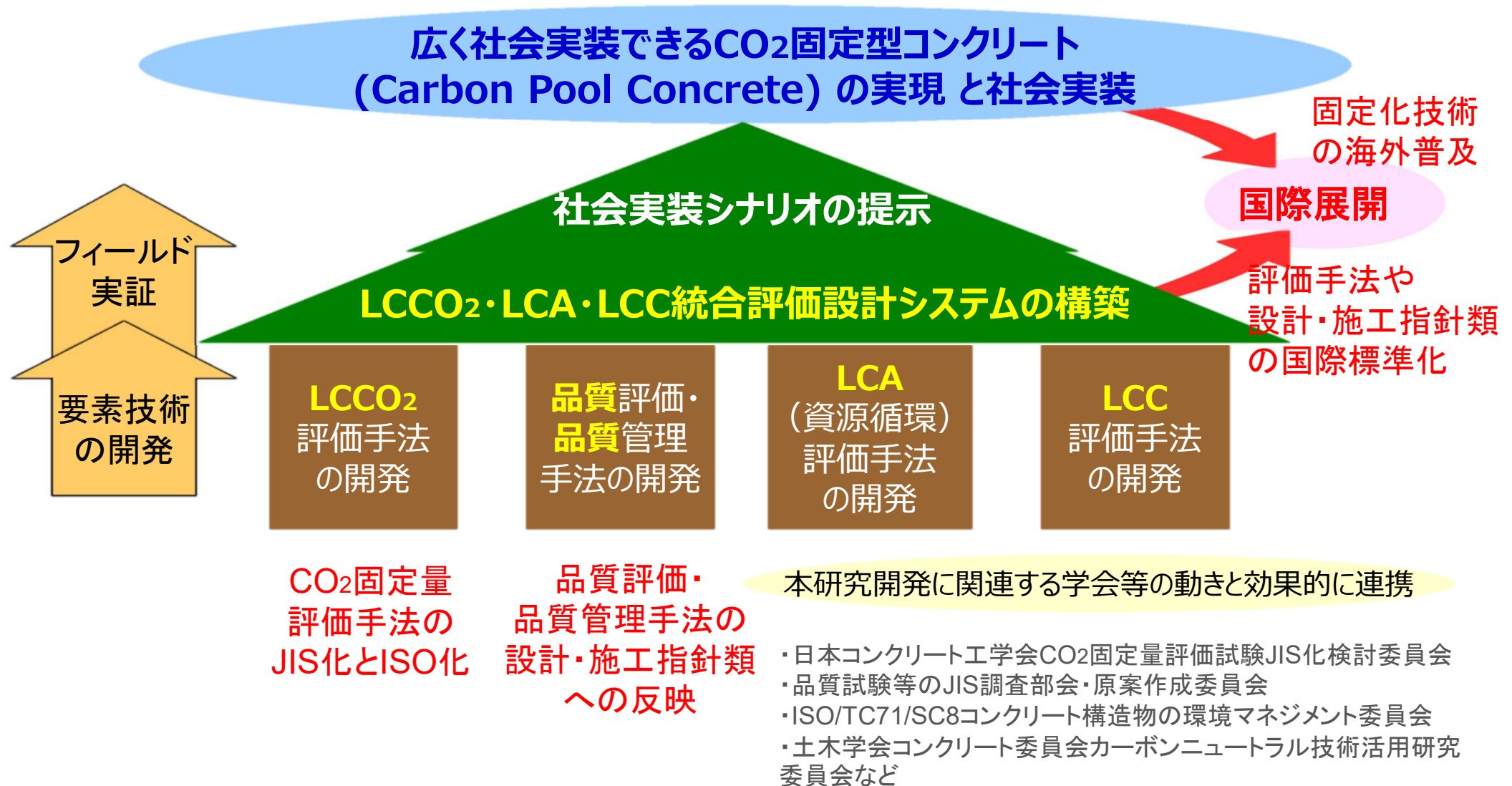
発表者名 山本 武志

*(一財)電力中央研究所・(国)東京大学・(公)東京都立大学・(国研)国立環境研究所・(学)明星大学

問い合わせ先 電力中央研究所 E-mail:t-yama@criepi.denken.or.jp TEL:070-6568-9740

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な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

2. LCCO₂・LCA・LCC統合 評価設計システムの構築

研究開発内容

- ① CO₂固定量評価手法の開発
- ② 品質評価・品質管理手法の開発
- ③ LCA（材料資源）評価手法の開発
- ④ LCC評価手法の開発
- 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

開発目標

「広く社会実装できるCO₂固定型コンクリートの実現」に必要な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

成果の反映先

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

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

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

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

- ・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

CARBONPOOLコンクリートのLCCCO₂・LCA・ LCC総合評価設計システムの構築

成果概要報告

2026/07/22

電力中央研究所

実施内容

研究開発内容

1 CO₂固定量 評価手法の開発

直近のマイルストーン

後続分析手法①の
JIS素案

これまでの開発進捗

- ・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¹³C/¹²C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細骨材の半分を砕砂置換、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

カーボンプレジットを含む
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。
- ・Jクレジット等の情報から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、LCCO₂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。

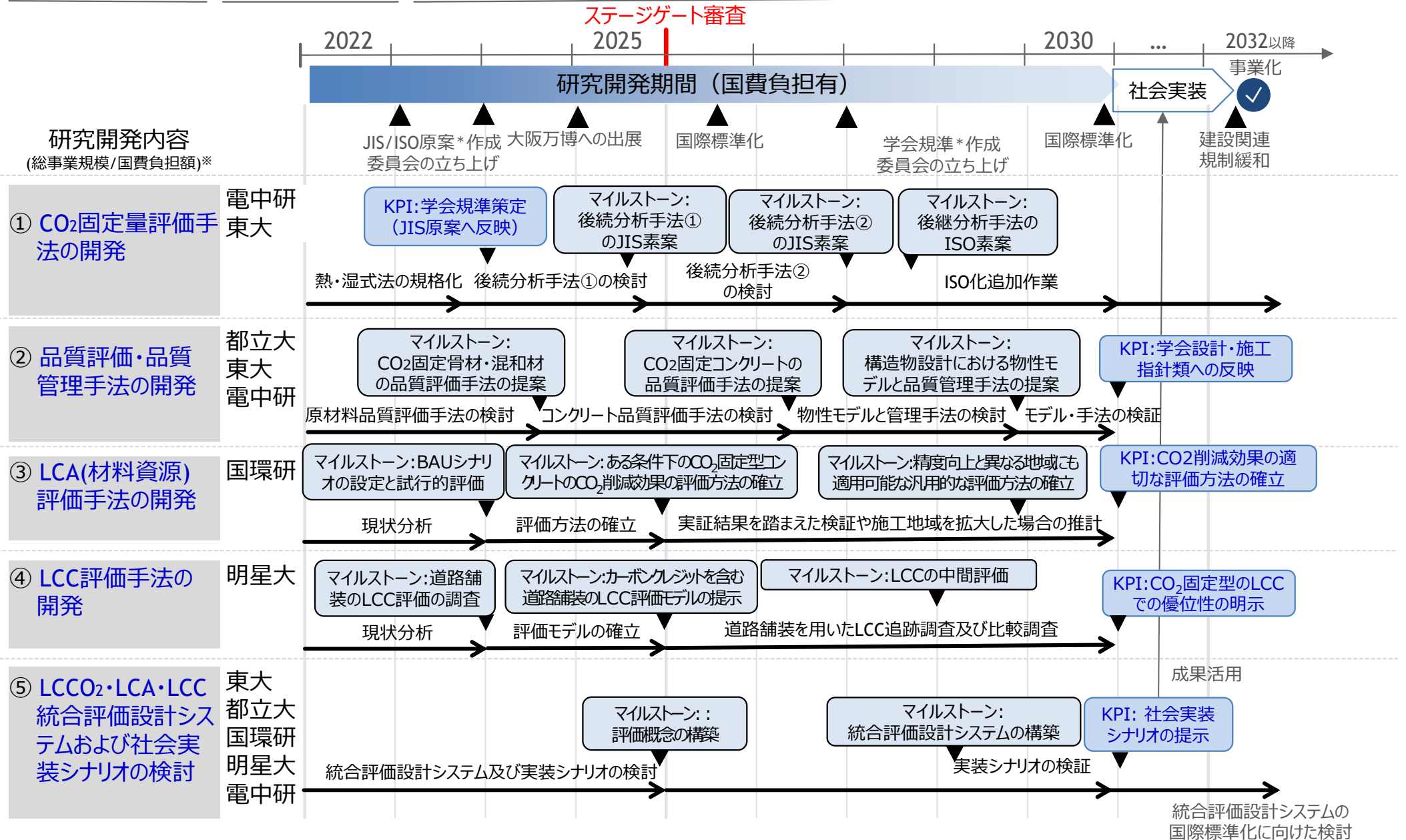
研究工程

研究開発項目

実施主体

実施スケジュール

* : CO2固定量評価試験方法に関して



主要な成果1)

① CO₂固定量評価手法の開発

* CO₂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 sequestered 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 CO₂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CO₂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CO₂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粗骨材バイオマス排ガスCO ₂ 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CO₂の¹³C/¹²C≒1.24%程度である。化石燃料由来の排ガス中のCO₂の¹³C/¹²C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了CO₂ボンベのCO₂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CO₂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

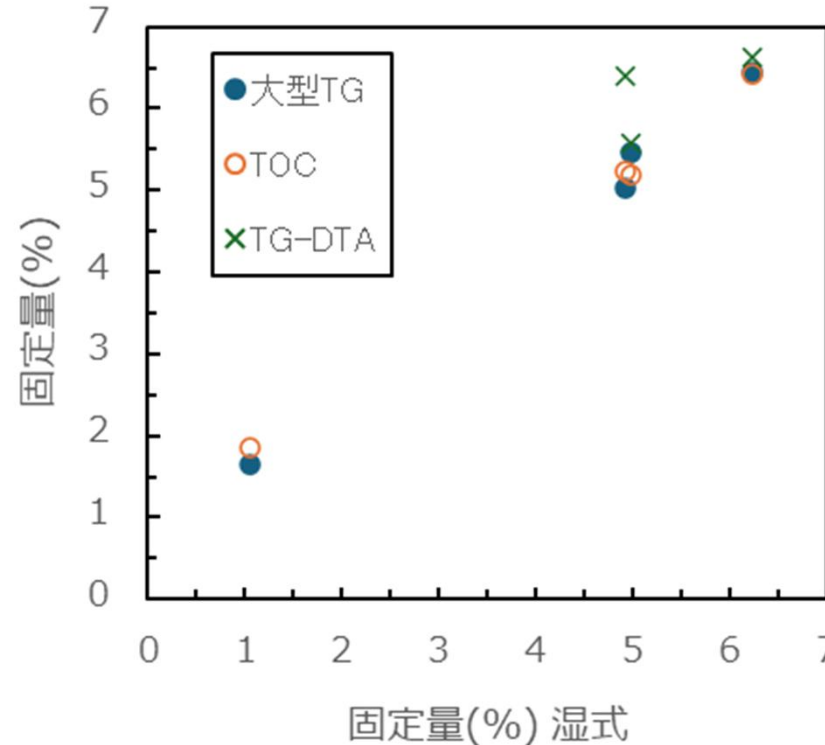


図 従来法と大容量法の再現性比較

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

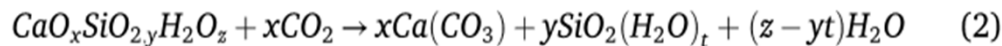
- ・室温⇒10℃/分⇒550℃(5時間保持)⇒850℃(10時間保持)、両温度間での質量差分を評価
- ・分析試料量を多くすること(粗粉碎、1kg程度)でサンプリングエラーを低減

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)



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(CO₂接触割合、浸透深さ)
- ・供用期間(CO₂浸透量、固定量)
- ・炭酸化速度(CO₂固定速度)
- ・供用環境(CO₂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CO₂固定量推定値、解体ガラの保管時CO₂固定量推定値を合算した。

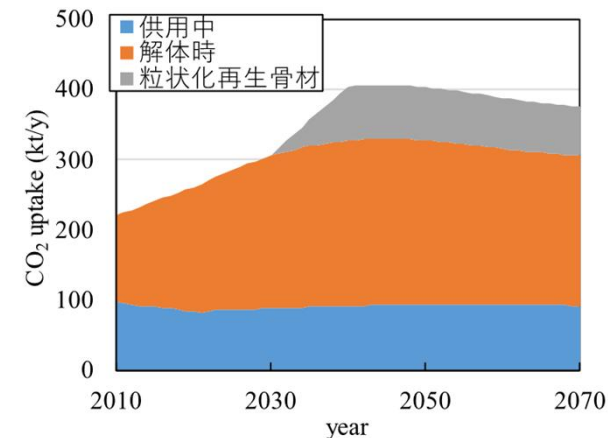
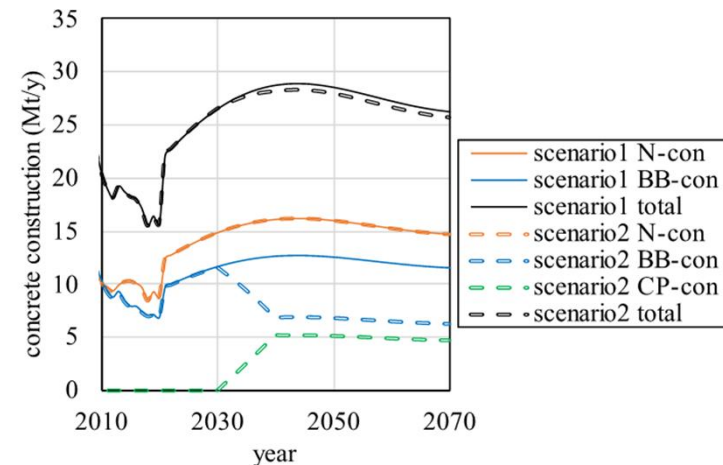
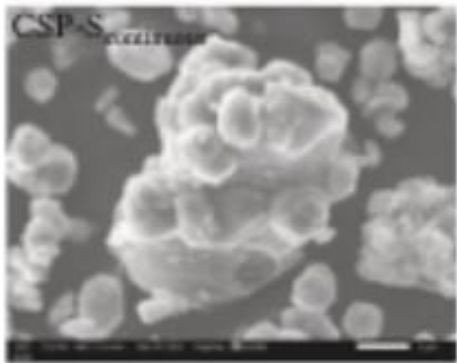


図 道路用コンクリート量予測値とCO₂固定総量推定値

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

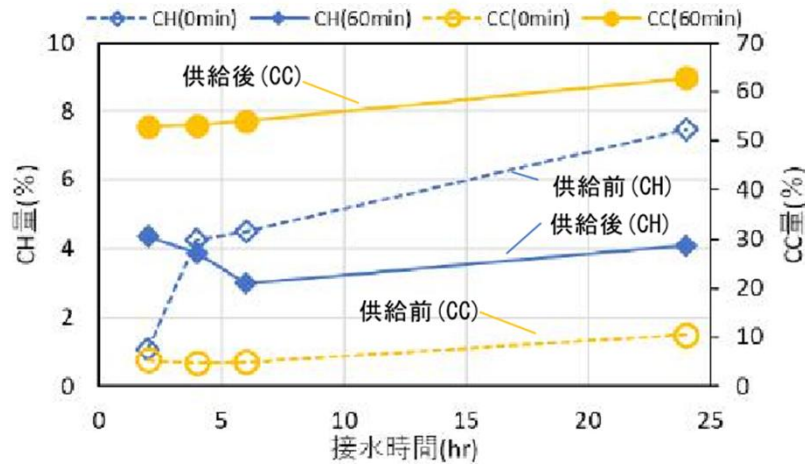


図1 CO₂バブリング水の接触時間と水酸化カルシウム(CH)と炭酸カルシウム(CC)量

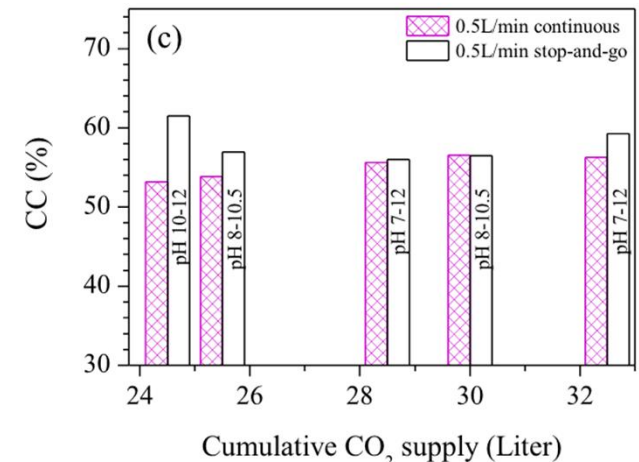


図2 CO₂バブリング水の供給方法(一定流量および間欠供給)と炭酸カルシウム(CC)量

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CO₂バブリングを行い、得られたCSPの活性度指数を評価した。

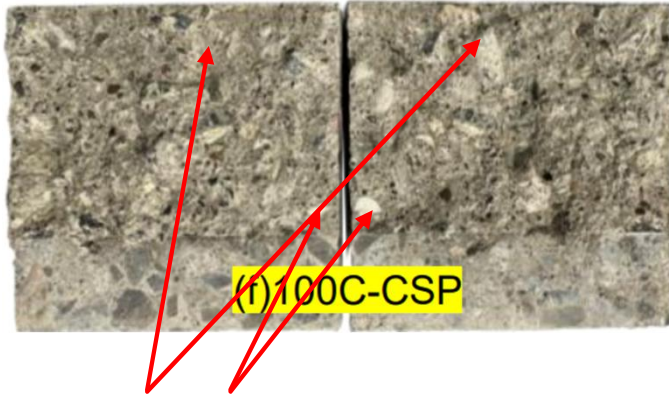
・スラッジ水を長時間貯蔵した方が水酸化カルシウム(CH)量が増大し、CO₂バブリング後の炭酸カルシウム(CC)生成量が増大するため(図1)、実装時はCO₂バブリングを開始すれば良いことが分かった。

・液相のpH上昇後にCO₂を間欠バブリングする方がCO₂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CO₂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

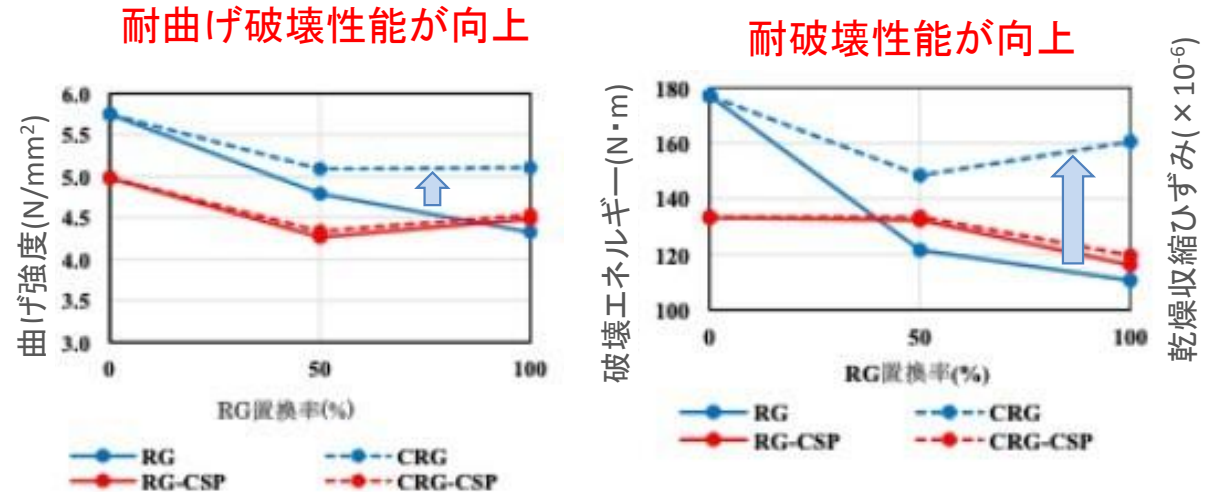


図 曲げ強度と破壊エネルギーの比較

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固定量の関係性を評価した。

⇒力学特性と粒状化CP粗骨材のCO₂固定量の間に良好な相関が認められ、固定量が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CO₂を固定(CRG)することで舗装用コンクリートの力学特性が向上(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CO₂環境下で養生することを提案

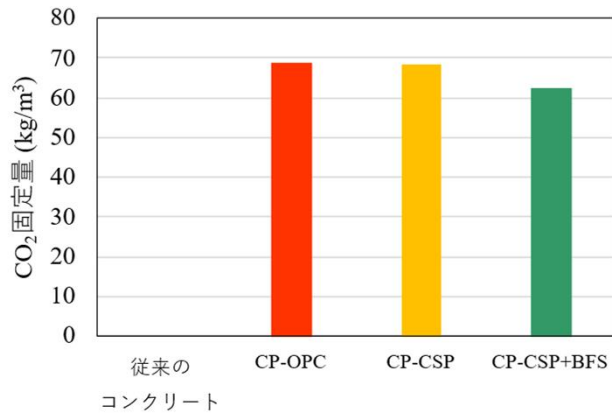


図1 炭酸化養生によるCO₂固定量

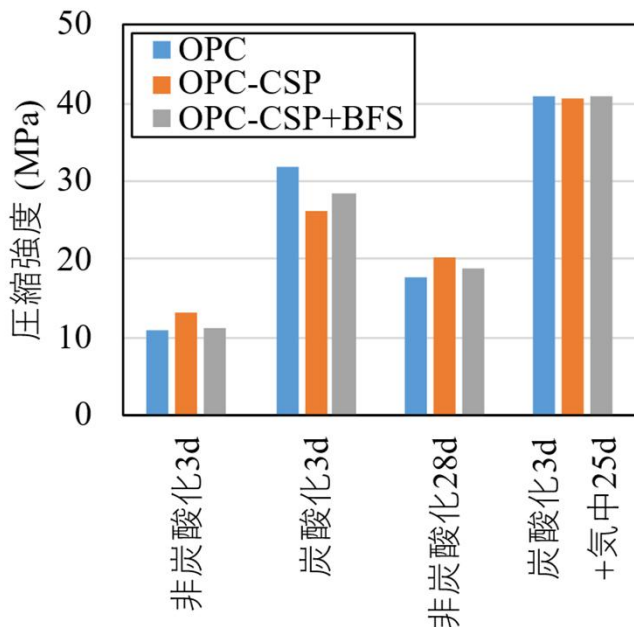


図2 炭酸化養生前後の圧縮強度

・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CO₂環境下で養生し、CO₂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CO₂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CO₂固定量を観測する必要がある。

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+炭酸化スラッジ粉末+高炉スラグ	5.2	152

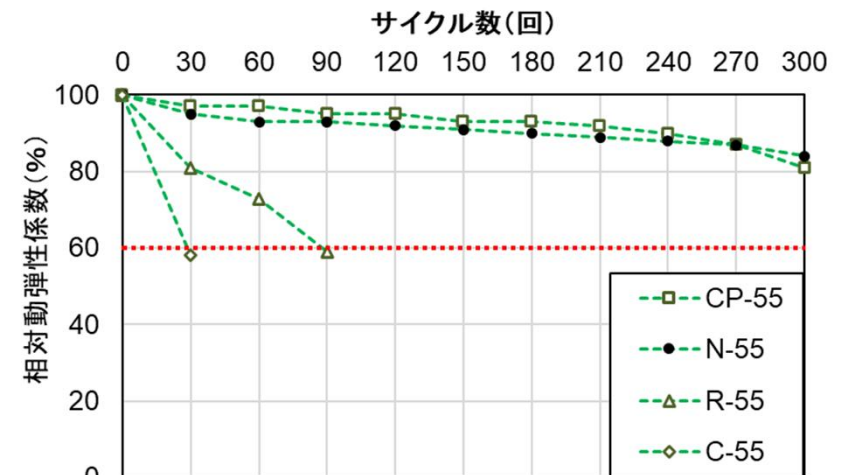


図 凍結融解試験^{注)}による耐久性指数の比較¹⁴

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

プロセス	資材分類	資材名	備考	GWP	CO2	LIME2	LIME3
①原料調達 (A1)		練り混ぜ水		0.0	0.0	1.4	0.0
①原料調達 (A1)		普通ポルトランドセメント (OPC)		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A1)		高炉セメントB種 (BB)		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A1)		高炉スラグ微粉 (BFS)		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A1)		BB+高炉スラグ微粉		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A1)		A/E水		8.8	7.9	291.9	1.1
①原料調達 (A1)		CPスラグ微粉 (CPCSP)		1.0	0.9	15.5	0.1
①原料調達 (A1)		炭酸化再生微粉 (CPRGA)		12.8	12.4	64.6	1.1
①原料調達 (A1)		炭酸化再生微粉 (CPRGA)		17.1	16.5	86.1	1.4
①原料調達 (A1)		普通セメント					
①原料調達 (A1)		普通セメント					
①原料調達 (A1)		炭酸化スラグ水					
①原料調達 (A2)		練り混ぜ水					
①原料調達 (A2)		普通ポルトランドセメント (OPC) 輸送		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A2)		高炉セメントB種 (BB) 輸送		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A2)		BB+高炉スラグ微粉 輸送		0.0	0.0	0.0	0.0
①原料調達 (A2)		A/E水 輸送		0.5	0.5	4.5	0.0
①原料調達 (A2)		CPスラグ微粉 (CPCSP) 輸送		1.35E+00	1.2E+00	1.26E+01	1.18E-01
①原料調達 (A2)		炭酸化再生微粉 (CPRGA) 輸送		8.1	7.7	75.7	0.7
①原料調達 (A2)		炭酸化再生微粉 (CPRGA) 輸送		10.8	10.3	101.0	0.9
①原料調達 (A2)		普通セメント 輸送					
①原料調達 (A2)		炭酸化スラグ水 輸送					
①製造 (A3)		電力 (CO2排出設備: 炭酸化)					
①製造 (A3)		電力 (製品検査機: CO2測定)					
①製造 (A3)		電力 (高炉スラグ管理設備: スチール)					
①製造 (A3)		電力 (製品検査機: スチール)					
①製造 (A3)		プラント調剤					
①製造 (A3)		入件費					
①製造 (A3)		CP材料保管費 (サイロ入替等)					
①製造 (A3)		サイロ等保管設備費用 (入替前)					

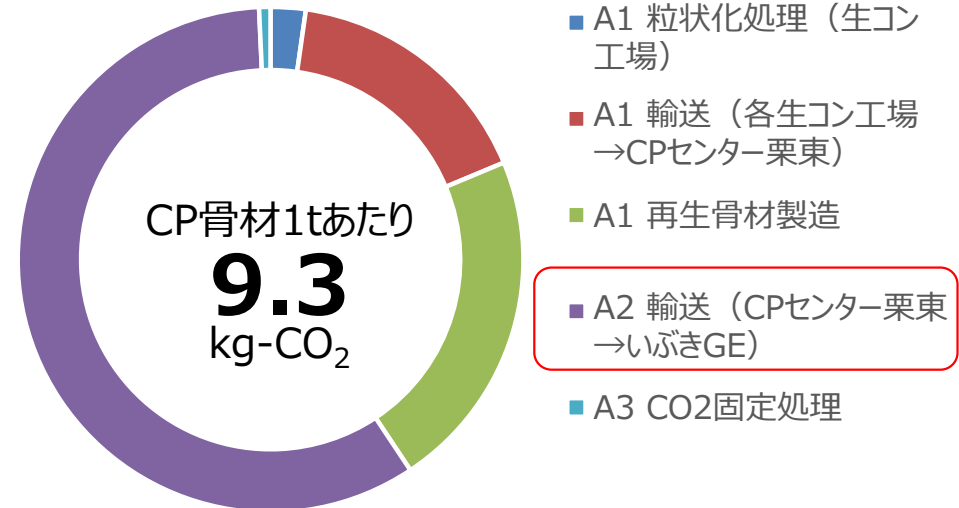


図 CP骨材製造段階で排出するCO₂量

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CO₂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、CO₂削減量とCO₂固定量に金銭的価値としてCO₂-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、CO₂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、製造費用に織り込んだ。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、CO₂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CO₂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。CO₂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

* CO₂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CO₂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CO₂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(CO₂-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CO₂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

①CO₂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攪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CO₂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