

「炭素循環型セメント製造プロセス 技術開発」

(事後評価)

(2020年度～2021年度 2年間)

プロジェクトの概要 (公開)

NEDO

環境部

2022年6月23日

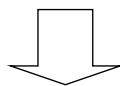
0

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆ 事業実施の背景と事業の目的

社会的背景

- ・セメント産業からの温室効果ガス排出は、世界全体の約8%を占める
- ・エネルギー消費に加えて原料(石灰石)からCO₂が発生するため削減が困難



世界全体でセメント産業における脱炭素に向けた革新的なイノベーションに向けた技術開発が進められている

事業の目的

2030年以降、既存セメントと同等価格以下及び同等性能以上とすることを目標に、製造工程で発生するCO₂を回収し、炭酸塩として固定化後、原料や土木原料として再資源化する、セメント製造プロセス構築を目指す。

◆政策的位置付け

「革新的環境イノベーション戦略」(2020年1月閣議決定)

Ⅲ 産業

CC

カーボンリサイクル技術によるCO₂の原燃料化など

② CO₂を原料とするセメント製造プロセスの確立 / CO₂吸収型コンクリートの開発 他

【目標】

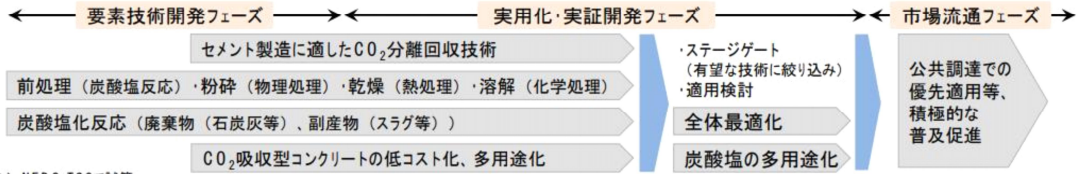
- 2030年以降、既存セメントと同等価格以下かつ同等性能以上とすることを目標に、製造工程で発生するCO₂を回収し、炭酸塩として固定化後、原料や土木資材として再資源化するセメント製造プロセス構築を目指す。同様に、既存コンクリートと同等価格以下かつ同等性能以上とすることを目標に製造時にCO₂を吸収するコンクリートについて、用途拡大等に向けた新しい製造プロセス構築を目指す。また、技術確立後、速やかな公共調達での優先適用等を通じた、政府としての積極的な普及推進策についても検討する。2050年における世界全体のCO₂削減量は約43億トン。¹⁾
- その他、紙資源の再利用・製造工程における省エネルギー、バイオマス燃料を利用した燃料転換の推進等により、紙・パルプ分野におけるCO₂削減を目指す。

【技術開発】

- セメント製造プロセスにおいて、2030年頃の実用化を目指し、製造工程で発生するCO₂を分離回収し、廃コンクリートや生コンを用いて炭酸塩として固定化し、石灰石の代替として原料利用する技術や、その他の炭酸塩に固定化し路盤材等の土木資材として再資源化する技術等の要素技術開発、実用化・実証開発等を実施する。2020年には、削減量10トン-CO₂/日(既存技術の500倍規模)までスケールアップする実証事業に着手する。
- CO₂吸収型コンクリートの材料となるCO₂と反応して硬化する特殊混和材を、鉄筋を使用するコンクリート製品や大型コンクリート構造物等の新たな用途で利用するための要素技術開発、実証開発及び実用化に向け普及拡大時の技術課題の調査等を実施する。

【実施体制】

- 将来のビジネス展開まで見据えた上で、セメント製造事業者を中心に、CO₂分離回収技術を有する大学や研究機関等と連携し、ナショナルプロジェクトとして技術開発を進める。
- CO₂吸収型コンクリートについても、将来のビジネス展開まで見据えた上で、ゼネコン等を中心に、ナショナルプロジェクトとして技術開発等を進める。



1) NEDO TSCで試算。

◆国内外の研究開発の動向と比較

分類	プロジェクト	動向・進捗など	本事業の特徴・優位性
CO ₂ 回収	Norcem Project 化学吸収法	<ul style="list-style-type: none"> 2014年5月～2015年10月 Brevik工場(ノルウェー)でパイロット試験実施(CO₂回収量3.6t/日 運転時間4500時間以上) (出典: J.N. Knudsen et al., Pilot Plant demonstration of CO₂ Capture from Cement Plant with Advanced Amine Technology, Energy Procedia 63, pp.6464-6475 (2014)) 2024年よりCO₂回収量400,000t/年の事業開始予定。 (出典: CCS at Norcem Brevik, https://www.norcem.no/en/CCS%20at%20Brevik) 	CO ₂ の回収⇒炭酸塩化、有効利用の資源循環過程として技術開発 ・既存のセメント製造プロセスに影響を与えない分離・回収方式を採用。 ・CO ₂ 分離回収設備に、従来と比較して高効率、コンパクト、熱安定性の高いアミン系吸収液を用いた設備を導入。 (CO ₂ 分離回収量: 10t/日)
	ECRA Project 酸素燃焼法	<ul style="list-style-type: none"> 2018年にパイロット設備の建設が公表。まだ実現していない。 (出典: Cement industry launches an industrial-scale carbon capture project, https://ecra-online.org/fileadmin/ecra/press_releases/Cement_Industry_Launches_Industrial-Scale_Carbon_Capture_Project.pdf) 	
	LEILAC-1 LEILAC-2 間接加熱	<ul style="list-style-type: none"> 2019年3月～2020年末 Lixhe工場(ベルギー)でパイロット試験実施。原料供給量公称10 t/h、72時間の連続運転。 LEILAC-2の実施公表(2020年4月～2025年3月) 原料供給量40t/h(4倍)、セメントクリンカの製造。 (出典: D.Raniel, LIFE IN LEILAC, WorldCement2021年8月号) 	
CO ₂ 有効利用	FastCarb 廃コン炭酸化促進技術	<ul style="list-style-type: none"> 解体コンクリートから得た骨材(再生砕石)を加速炭酸化。 試験室レベルとセメント工場に設置した設備での試験を実施。 生成したCO₂吸収後の骨材はコンクリートへの利用想定。 (出典: The FastCarb National Project, https://www.cpi-worldwide.com/uploads/journals/pdf/2020/01/en/01_2020_30_36.pdf) 	モデル工場として組み合わせ可能な有効利用技術メニューを技術開発 ・《廃コンCO ₂ 吸収・セメント原料化》 骨材に加え、セメント原料としての利用も可能なプロセスを開発。 ・《生コンCO ₂ 固定化》 類似技術のCO ₂ 固定量を上回る固定化技術を開発(対セメント質量1.5～2%)。
	Carbon Cure 生コンへのCO ₂ 注入	<ul style="list-style-type: none"> 生コンクリートに、0.5%前後(対セメント質量)のCO₂を注入し、固定化させる技術を確立、実用化。 北米の生コン製造業者を中心に300以上の工場での利用実績。(国内でも資本参加や、技術のライセンス契約を行った企業あり) (出典: 山岸弘大, 総合商社のカーボンリサイクルへの取組みと海外技術紹介, コンクリート工学 Vo.59, No.9, pp764-769 (2021)) 	

◆他事業との関係

事業名	事業実施期間
【環境省事業】 CO ₂ 分離回収技術に関する研究 ～セメントキルン排ガスからのCO ₂ 回収小規模実証試験～ (20kg-CO ₂ /日規模の実証)	2018～2020
【本事業】 炭素循環型セメント製造プロセス技術開発 (10t-CO ₂ /日規模のパイロット実証及びその再資源化)	2020～2021
【GI基金】 セメント製造プロセスにおけるCO ₂ 回収システムの開発 (石灰石からの排出CO ₂ を100%近く回収する技術確立を目指す)	2021～2030

7

◆実施の効果 (費用対効果)

プロジェクト費用の総額 15.4億円 (助成金額(補助率1/2))

本プロセス開発で想定されるCO₂削減効果 35万 t -CO₂/年

CO₂削減量に相当する排出枠価格

(欧州ETS価格換算の参考値) 36億円程度/年

→ CO₂の価値によるものの、費用対効果の妥当性は認められる

【経済効果算定】

- a. 廃コンクリート発生量= 3,690万t (国交省, H30年度建設副産物実態調査結果)
- b. 廃コンクリートのセメント含有量= 13.6 wt% (神田, コンクリート工学, 2011)
- c. 廃コンクリート中のセメントに固定するCO₂量= 70 kg-CO₂/t-cem. (アウトプット目標)
- d. CO₂削減量= a×b×c ≒ 35万t-CO₂/年
- e. CO₂排出枠価格= 約80€/t-CO₂ (2021年末)
- f. 為替レート= 約130円/€ (2022年平均値)
- g. 経済効果= d×e×f ≒ 36億円/年

◆ 事業の目標

1. セメント工場に最適なCO₂分離・回収システムを構築
2. CO₂をセメント廃棄物等に固定する技術の確立
3. CO₂排出削減効果・固定効果の評価

(詳細は次ページ以降)

◆ 研究開発のスケジュール

計画通り事業期間内に目標を達成

	2020年度	2021年度
1. 化学吸収法によるセメントキルン排ガスからのCO ₂ 分離・回収 アミン系吸収液の調査・選定・評価 C O ₂ 分離・回収パイロットプラントの設計・建設 パイロットプラントを用いた運転条件の最適化		
2-① 廃コンクリートによるCO ₂ 吸収及び建設資材・セメント原料としての利用技術開発 ラボ試験によるC O ₂ 固定化条件の最適化 外熱キルンによるC O ₂ 固定化条件の確認と課題抽出 加熱炭酸塩処理実証設備の設計・製作、実証設備の設置、実証設備によるC O ₂ 固定化条件の最適化 ラボ試験による設備選定、運転条件の最適化、ラボ試験による回収物、再生骨材、路盤材の品質・性能評価 破碎・選別回収実証設備の設計・製作 実証設備の設置 実証設備による運転条件の最適化 実証設備による回収物の品質評価		
2-② 生コンスラッジを用いたCO ₂ 固定化技術の開発 ラボ試験によるC O ₂ 固定化条件の最適化 ラボ試験によるセメント・コンクリートの品質確認 生コンスラッジ炭酸塩化実証設備の設計・設置 実証設備によるC O ₂ 固定化条件の最適化 実証設備で製造されたセメント・コンクリートの品質評価		
2-③ 低炭素型炭酸塩化養生コンクリート製品の開発 ラボ試験による新規セメント系材料の開発 コンクリート製品の配合選定・炭酸塩化養生条件の最適化 テストキルンを用いた新規セメント系材料の製造 コンクリート製品の炭酸塩化養生実証設備の設計・設置及びコンクリート製品の製造と性能確認		
2-④ 生コンへのCO ₂ 固定化技術の開発 ラボ試験によるC O ₂ 注入条件の最適化、ラボ試験によるコンクリートの基本性能評価 超微細気泡発生装置の選定と設置方法の検討 実規模プラントでのC O ₂ 固定技術の実証、実証で製造されたコンクリートの性能評価		
3. CO ₂ 排出削減効果・固定効果の評価 評価方法/評価条件の設定、評価に必要なデータ収集項目の設定 技術開発データを用いた一次評価の実施と分析 開発状況による評価条件、収集データの見直し 技術開発データを用いた一次評価の見直し 普及期等の条件を考慮した評価の実施と解釈		

◆プロジェクト費用

◆費用

(単位：百万円)

研究開発テーマ	2020年度	2021年度	合計
炭素循環型セメント製造プロセス技術開発	224	1,315	1,539

助成金額(補助率1/2)



CO₂分離・回収設備



CO₂有効利用設備

導入された実証試験設備

費用の内容から妥当性を確認して決定

◆研究開発の実施体制



・研究開発実施項目と役割を確認
・技術推進委員会を実施

◆研究開発の進捗管理

NEDOは、研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な措置を講じた。

主担当、主任研究者による進捗把握・管理

研究開発実施者との連携による、研究開発の進捗状況の把握。具体的には、従事日誌、月間工程表、執行管理表及び現地調査等による実施状況の確認を通じ、目標達成に対して適切に進捗しているか確認し、CO₂排出の評価・キルン排ガスに対するディスカッションなど、事業の効率的な実施に対する指導を行った。

また、下記の通り、事業者による技術推進委員会の設置を促すとともに、その開催にあたっては、外部有識者の意見が適切に事業へ反映されているかNEDOの立場で確認することを通じ、技術面での必要な検討を促した。

【参考】技術推進委員会の開催実績

- 第1回 2020年10月23日 熊谷工場
- 第2回 2021年4月12日 中央研究所
- 第3回 2021年9月17日 本社
- 第4回 2022年2月7日 熊谷工場

◆動向・情勢の把握と対応

情勢	対応
<p>2020年10月に、日本政府は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、12月にMETIは「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定し、「グリーンイノベーション基金」が創設された。</p>	<p>グリーンイノベーション基金事業の基本方針に基づき「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」を立上げた。そのなかで本事業の成果を踏まえてセメント製造過程で発生するCO₂を全量近く回収でき、既存と同等以上のコスト低減を目指す技術開発を開始した。</p>

◆知的財産権等に関する戦略 (3)

NEDO知財マニュアルを基礎としつつ、事業者において、以下のような具体的な活動・検討も実施

1. 類似技術の特許調査と整理

調査を通じ、本事業の知財について、特許とする優先順位、出願内容・範囲の選定を行った。また、2. に示す作業も行い、周辺特許の出願をするなど、俯瞰的な対応を実施。

2. 特許マップの作成

製造フロー、組成物、用途、システム等に分類し、関連特許のマッピングを実施。これを踏まえて、1. の出願リストを作成。

3. 公開・非公開の基準の摺り合わせ

原則出願としたが、生コンへのCO₂固定、低炭素型炭酸化養生コンクリート関連など、ノウハウとして保有すべく非公開とした。

4. 海外出願

技術の重要性、海外での実施実現性などを考慮し、必要に応じて、海外出願も行った。

	2020年度	2021年度	計
特許出願 (うち外国出願)	5 (0)	7 (1)	12 (1)件

※2022年3月31日現在

20

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

	セメントキルン排ガスからのCO ₂ 分離・回収	廃コンへのCO ₂ 固定化技術	セメントペースト骨材分離回収技術	生コンスラッジへのCO ₂ 固定化技術	低炭素型炭酸化養生コンクリート製品製造技術	生コン(軽量盛土)へのCO ₂ 固定化技術
材料						
産物		  				
目標	連続100hr運転のべ500hr運転CO ₂ 濃度99%以上	70kg以上CO ₂ /t-cem	微粒分のセメントペースト量70%以上	125kg以上CO ₂ /t-cem	320kg以上CO ₂ 削減/t-cem	10kg以上CO ₂ /t-cem
成果	連続244hr運転のべ528hr運転CO ₂ 濃度99.6%	76kg	70%超	250kg超	405kg-CO ₂ 削減	22kg

◆研究開発項目毎の目標と達成状況 (1)

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み (中間) / 一部達成 (事後)、×未達

研究開発項目	目標	成果	達成度
1. 化学吸収法によるセメントキルン排ガスからのCO ₂ 分離・回収	<ul style="list-style-type: none"> セメントキルン排ガスの分離・回収に適したアミン系吸収液の調査・選定 10t/日規模のCO₂分離・回収パイロットプラントを用いた運転条件の最適化 実機スケール設備に向けた課題抽出・経済性評価 	<ul style="list-style-type: none"> CCL社のアミン系吸収液が最もCO₂吸収・脱離ポテンシャルが高いことを確認 パイロットプラントで10t-CO₂/日を満たす基本運転条件を達成(連続100時間以上、回収CO₂濃度:99%以上) LCAにより現状を把握 	○
2-① 廃コンクリートによるCO ₂ 吸収及び建設資材・セメント原料としての利用技術開発	<ul style="list-style-type: none"> i) CO₂固定化技術 加熱炭酸化処理実証設備によるCO₂固定化条件の最適化 ii) セメントペースト・骨材分離回収技術 	<ul style="list-style-type: none"> 実証設備の安定運転に成功し目標のCO₂固定量を達成(70kg-CO₂/t-cem.以上) 廃コンクリートに適した破碎方式を把握、粒度毎の選別機の運転条件を確立し回収物の目標品位を達成(微粒分中のセメント含有率70%以上) 	○
2-② 生コンスラッジを用いたCO ₂ 固定化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 実証設備による生コンスラッジを用いたCO₂固定化条件の最適化 セメント原料に使用した際のセメント・コンクリートの品質評価 	<ul style="list-style-type: none"> 実証設備のCO₂固定化条件を最適化しCO₂固定量を達成(125kg-CO₂/t-cem.以上) セメント工場での実機設備で生コンスラッジ(CO₂固定後)を添加したセメントを製造し品質に問題ないことを確認 	○

◆研究開発項目毎の目標と達成状況 (2)

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み (中間) / 一部達成 (事後)、×未達

研究開発項目	目標	成果	達成度
2-③ 低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の開発	<ul style="list-style-type: none"> 実規模プラントおよび炭酸化養生実証設備で製造されたコンクリート製品の性能確認 	<ul style="list-style-type: none"> 低炭素型の新規セメント系材料の開発と製造に成功 新規セメント系材料を用いた炭酸化養生ILブロックを実製品工場で製造し、駐車場舗装ととして供用性に問題ないことを確認 製造したILブロックは目標のCO₂削減・固定量を達成(320kgCO₂/t-cem.以上) 	○
2-④ 生コンへのCO ₂ 固定化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 実規模プラントで製造した生コンへのCO₂固定技術の実証 コンクリートの硬化性能の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 効率的なCO₂注入方式としてセメントスラリー方式を新たに開発 生コンや軽量土の品質を損なわず目標のCO₂固定量を達成(10kg-CO₂/t-cem.以上) 	○
3. CO ₂ 排出削減効果・固定効果の評価	<ul style="list-style-type: none"> 実証試験データに基づくCO₂排出削減効果・固定効果の評価 本技術の導入による普及期のCO₂削減ポテンシャルの推定 	<ul style="list-style-type: none"> モデル工場を設定した評価により、本技術の導入による普及期のCO₂削減ポテンシャルおよび開発した技術の有効性を示した。 	○

◆プロジェクトとしての達成状況と成果の意義

1. プロジェクトの達成状況

本プロジェクトにおいて掲げた研究テーマについては、研究開発項目の目標値を達成

- ① セメントキルン排ガスから10t-CO₂/日を分離・回収するパイロットプラントを設置。連続運転による適用を検証した
- ② 回収したCO₂を廃コンクリートに短時間で固定化、CO₂を固定した廃コンクリートのセメント原料化あるいは、骨材化等の要素技術を確立
- ③ 生コンストラッジ、コンクリート製品、生コンを活用したCO₂有効利用・炭酸塩化技術を開発

2. プロジェクトの成果の意義

キルンから発生するCO₂分離回収とCO₂の固定化で技術的知見を得た。

◆成果の普及

	2020 年度	2021 年度	計
論文	0	0	0
研究発表・講演	0	3	3
受賞実績	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	8	8
展示会への出展	0	0	0

※2022年3月31日現在

◆知的財産権の確保に向けた取組

「2. 知的財産権等に関する戦略」を踏まえ、具体的な取組を実施

- 報告会を定期的に行い、業界動向や他社特許について協議/共有することを通じて、他社特許や論文等を調査分析を実施した。
- パテントクリアランスチェックを実施しつつ、二酸化炭素の固定化方法/廃コンクリートからのセメント原料回収方法/クリンカ粉末及びその製造方法について基本特許を出願。
- 周辺特許についても、オープン/クローズ戦略を意識して出願要否を判断し、必要な場合特許出願済み。

	2020年度	2021年度	計
特許出願（うち外国出願）	5(0)	7(1)	12(1)件

※2022年3月31日現在

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

本事業は、セメント生産プロセスそのものの脱炭素化を目標とした事業であることから、実用化を以下のように定義する。





「セメントキルン排ガスから発生するCO₂を分離・回収設備によって回収するとともに、その回収したCO₂を活用し、廃コンクリートを用いて炭酸塩を製造して、原料化や再資源化すること」

事業化を以下のように定義する。

「商用設備において本事業で開発した技術を用いて、円滑な生産・事業活動を行うこと」

◆実用化・事業化に向けたスケジュール

- ・ 2022～2023年度：実証試験の継続
- ・ 2024～2026年度：改善した設備での実用化を想定した試験（必要に応じ大型化など）
- ・ 2027～2029年度：実設備導入の投資判断、事業環境判断。判断結果により工事着工
- ・ 2030年度～：事業開始（1工場に有効利用設備を設置）

年度	2022～2023	2024～2026	2027～2029	2030～
実証試験など	 今回助成金設備による 実証試験継続 (運転技術の確立)	 改善した設備等での実用化 を想定した試験 (必要に応じ大型化など)		
設備投資・着工			 設備投資判断(注)・ 工事着工	
事業開始				 事業開始(1工場に有効 利用設備を設置し、生産 開始)

(注) この段階での技術的完成度、ならびに当該時期の事業環境状況（炭素税、製品価値等）により投資判断。

33

◆成果の実用化・事業化の見通し

現状、キルンから発生するCO₂分離回収とCO₂の固定化で技術的知見を得られているが、前ページの行程表に示すとおり、実用化に向けて以下のような部分で検討を継続する必要がある。

- ・ 2022～2023年度：実証試験の継続
 - ① CO₂回収技術 連続運転の継続検証、熱収支評価、各種アミンの評価
 - ② CO₂利用技術 廃コンクリート炭酸化の更なる向上策検討
- ・ 2024～2026年度：改造した設備での実用化を想定した試験
 上記期間の試験結果を踏まえての設備改造、ならびに各課題についての更なる検証ならびに必要に応じた大型化

◆波及効果

セメント工場は国内に30工場あり、その工場に適用されれば、大幅なCO₂削減に繋がる。