

「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」

事業原簿

公開版

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

—目次—

概 要

プロジェクト用語集

1. 事業の位置付け・必要性について	1-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ.....	1-1
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性.....	1-4
2.1 NEDO が関与することの意義.....	1-4
2.2 実施の効果（費用対効果）.....	1-5
2. 研究開発マネジメントについて	2-1
1. 事業の目標.....	2-1
2. 事業の計画内容.....	2-1
2.1 研究開発の内容.....	2-1
2.2 研究開発の実施体制.....	2-7
2.3 研究開発の運営管理.....	2-8
2.4 研究開発成果の実用化・事業化 [※] に向けた マネジメントの妥当性.....	2-9
3. 情勢変化への対応.....	2-10
3. 研究開発成果について	3-1
1. 事業全体の成果.....	3-1

2.研究開発項目毎の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3-1

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて・・・・・・・・4-1

1.成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて・・・・・・・・4-1

(添付資料)

- ・プロジェクト実施方針
- ・プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果）
- ・特許論文等リスト

概要

		最終更新日	2022年6月23日		
プロジェクト名	炭素循環型セメント製造プロセス技術開発	プロジェクト番号	P20013		
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 主担当 井原 公生 (2020年7月~2022年3月) " " 木下 茂 (2022年4月~6月)				
0. 事業の概要	<p>本事業では、セメント製造工程のCO₂を再資源化し、セメント原料や土木資材として再利用する技術の開発や、実用化に向けた実証試験を実施する。セメント工場内にCO₂分離・回収実証設備を設置して、セメントキルン排ガス中から1日当たり10トンのCO₂を分離・回収する実証試験を実施する。この規模でセメント工場においてCO₂を分離・回収する実証試験は、国内で初めてである。また、分離・回収したCO₂を廃コンクリートや生コンクリートスラッジを用いて炭酸塩として固定化し、セメント原料や道路舗装用の路盤材などとして再資源化する要素技術を開発する。</p> <p>本事業により、セメント工場に最適なCO₂分離・回収システムや、CO₂を原料とする製造プロセス技術を確立し、社会実装の初期段階として、2030年度までに国内のセメント工場への導入を目指す。</p>				
1. 事業の位置 付け・必要性に ついて	<p>地球規模の課題である気候変動問題を解決するためには、クリーンエネルギー技術の開発と実用化に向けた抜本的コストダウンが必要。</p> <p>日本としても、世界の脱炭素化を牽引すべく、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年6月閣議決定）において、『2050年までに80%の温室効果ガス削減を目標とすること』、『非連続的なイノベーションを創出するために革新的環境イノベーション戦略を策定すること』等を表明。</p> <p>また、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。</p> <p>本事業では、革新的環境イノベーション戦略を加速化させるため、CO₂排出量の多いセメント産業において、当該戦略の中に位置づけられているカーボンリサイクル技術の開発による原料化や再資源化するセメント製造プロセス構築を実施する</p>				
2. 研究開発マネジメントについて					
事業の目標	<p>a) セメント工場に最適なCO₂分離・回収システムを構築：セメントキルン排ガスに適した経済的で効率的なCO₂吸収液・回収プロセスの選定(目標：10t-CO₂/日規模の実証による検証)</p> <p>b) CO₂をセメント廃棄物等に固定する技術の確立：廃コンクリート中のセメントに固定するCO₂量70kg-CO₂/t-cem.*以上(自主目標：100kg-CO₂/t-cem.以上)</p> <p>c) 本助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」の「実施方針」に記載の「最終年度目標」に関連する目標に加えて、廃コンクリート、生コンスラッジ、コンクリート製品、生コンを活用したCO₂有効利用・炭酸塩化技術の確立による総合的なカーボンリサイクルの実現に向けた技術開発及びCO₂排出削減効果・固定効果の評価</p> <p>*kg-CO₂/cem.: セメント1tあたりのCO₂量(kg)</p>				
事業の計画内容	主な実施事項	2020fy	2021fy		
	CO ₂ 分離・回収技術	←	→		
	CO ₂ 有効利用・炭酸塩化技術	←	→		
	CO ₂ 排出削減・固定効果の評価	←	→		
事業費推移 (単位:百万円) (助成)	会計・勘定	2020fy	2021fy	総額	
	特別会計(需給)	448	2,630	3,078	
	総NEDO負担額 (助成): 助成率 1/2	224	1,315	1,539	

開発体制	経産省担当原課	製造産業局素材産業課	
	助成先	太平洋セメント株式会社 共同研究先：国立大学法人東京大学、学校法人早稲田大学	
情勢変化への対応	グリーンイノベーション基金事業の基本方針に基づき「CO ₂ を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」を上げた。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CO ₂ 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。		
評価に関する事項	事前評価	2019年度実施 担当 製造産業局素材産業課	
	事後評価	2022年度 事後評価実施	
3. 研究開発成果について	<p>1.化学吸収法によるセメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収</p> <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 <p>2-①廃コンクリートによるCO₂吸収及び建設資材・セメント原料としての利用技術開発</p> <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) <p>2-②生コンスラッジを用いたCO₂固定化技術の開発</p> <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 <p>2-③低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の開発</p> <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) <p>2-④生コンへのCO₂固定化技術の開発</p> <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) <p>3. CO₂排出削減効果・固定効果の評価</p> <p>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。</p>		
	投稿論文	「査読付き」0件、「その他」7件	
	特許	「出願済」12件、「登録」0件、「実施」0件（うち国際出願1件）	
	その他の外部発表 (プレス発表等)	4件	

<p>4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見直しについて</p>	<p>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、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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 <p>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な応じた大型化</p>	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2020 年度実施方針策定：2020 年 2 月制定 2021 年度実施方針策定：2021 年 2 月制定</p>

プロジェクト用語集

用語の定義

セメント	:	水と反応して、硬化する鉱物質の微粉末。ポルトランドセメント、混合セメントなどがある。
クリンカ	:	ケイ素、アルミニウム、鉄、カルシウムのいずれかを含む原料を適切な割合で混ぜ、その一部が熔融するまで焼成して得られたもの。クリンカに石こうや少量混合成分を加えて粉砕したものがポルトランドセメント。
コンクリート	:	セメント、水、細骨材、粗骨材および必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜその他の方法によって混合したもの、または硬化させたもの。
モルタル	:	セメント、水、細骨材および必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜその他の方法によって混合したもの、または硬化させたもの。
セメントペースト	:	セメント、水および必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜその他の方法によって混合したもの、または硬化させたもの。
骨材	:	モルタルまたはコンクリートを造るために、セメントおよび水と練り混ぜる砂、砂利、砕砂、碎石、スラグ骨材、その他これらに類似の材料。
細骨材	:	10mm 網ふるいを全部通り、5mm 網ふるいを質量で 85%以上通る骨材。
粗骨材	:	5mm 網ふるいに質量で 85%以上留まる骨材
再生骨材	:	解体したコンクリート塊等の処理を行うことにより製造したコンクリート用の骨材。
廃コンクリート	:	コンクリート構造物・建物を解体し、さらに破碎したコンクリートの塊。
生コン	:	整備されたコンクリート製造設備を持つ工場(生コン工場)から、荷卸し地点における品質を指示して購入することができるフレッシュコンクリート(まだ固まらない状態のコンクリート)。JIS用語：レディーミクストコンクリート。
生コンスラッジ	:	生コン工場のミキサやアジテータ車の洗い水、建設現場で使用されずに残ったコンクリートや荷卸し検査に不合格となったコンクリートの処理排水に含まれる固形物。主にセメント水和物、未水和セメント、骨材微粒分から構成される。
コンクリート製品	:	常設された工場で製造され、最終的に使用される場所以外で製作されたコンクリート製品。
路盤材	:	道路の基礎として、道路表面から伝達される自動車等の荷重を分散して地表に伝える役割をもつ部材に用いられる材料。碎石のほか、コンクリートやアスファルトを細かく破碎した、再生路盤材などが用いられる。

1 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

地球規模の課題である気候変動問題を解決するためには、クリーンエネルギー技術の開発と実用化に向けた抜本的なコストダウンが必要である。日本としても、世界の脱炭素化を牽引すべく、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（2019年6月閣議決定）において、2050年までに80%の温室効果ガス削減目標を掲げるとともに、非連続なイノベーションの推進を表明した。また、2019年10月の「グリーンイノベーション・サミット」での議論を踏まえ、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。同戦略において、温室効果ガス削減量が大きく、日本の技術力による大きな貢献が可能な39テーマのひとつとして、「CO₂を原料とするセメント製造プロセスの確立」が設定された。

セメント産業は、世界の温室効果ガス総排出量の約8%に相当する二酸化炭素を排出している産業であり、その排出削減対策は重要な課題となっている。このうちの約6割を占める非エネルギー起源二酸化炭素については、セメントの中間製品であるクリンカを製造するプロセスで原料（石灰石）から化学反応によって必然的に発生するものである。そのため、クリンカを製造する限り、その排出削減は困難であり、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションが求められている。

本事業では、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションを創出するため、セメント工場及び近隣地域において、セメント製造工程のCO₂を再資源化し、セメント原料や土木資材として再利用する技術を開発する。

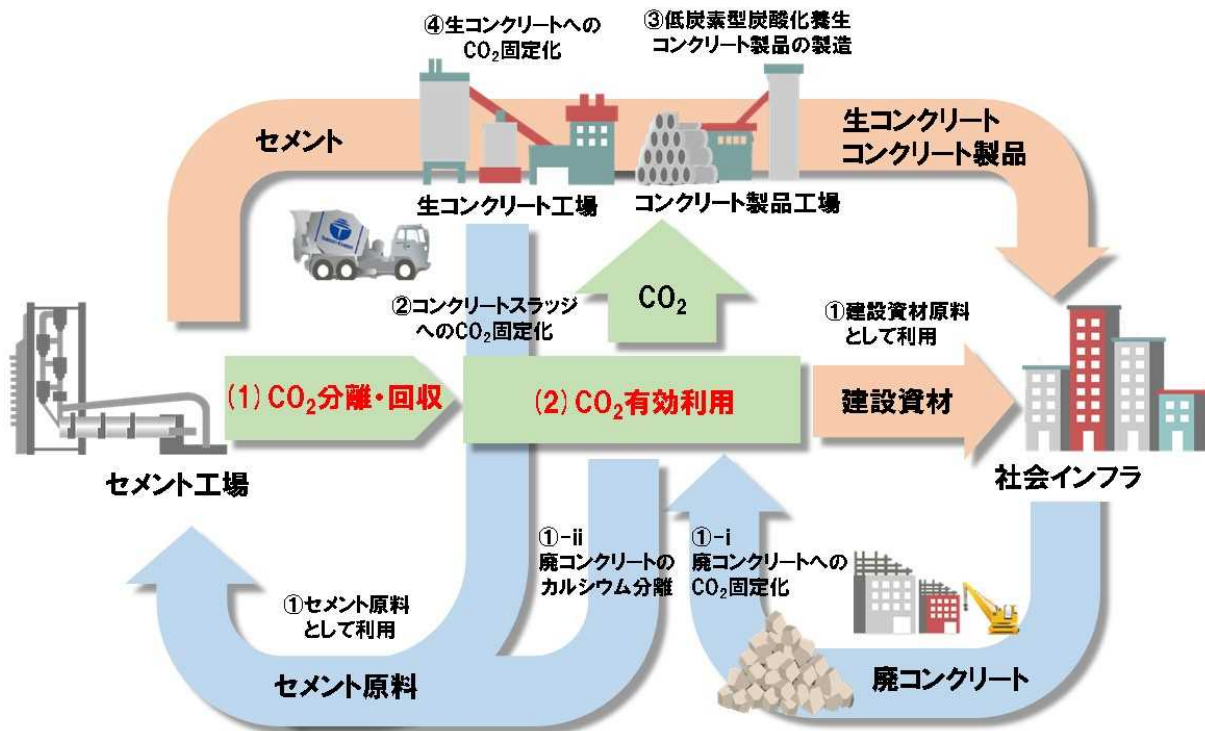


図-1 炭素循環型セメント製造プロセスの概念図

(1) 事業の背景

セメント産業は、世界の温室効果ガス総排出量の約8%に相当する二酸化炭素を排出している。このうちの約6割を占める非エネルギー起源二酸化炭素については、セメントの中間製品であるクリンカを製造するプロセスで原料（石灰石）から化学反応によって必然的に発生するものである。そのため、クリンカを製造する限り、その排出削減は困難であり、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションが求められている。

(2) 「革新的環境イノベーション戦略」(2020年1月閣議決定)が指すもの

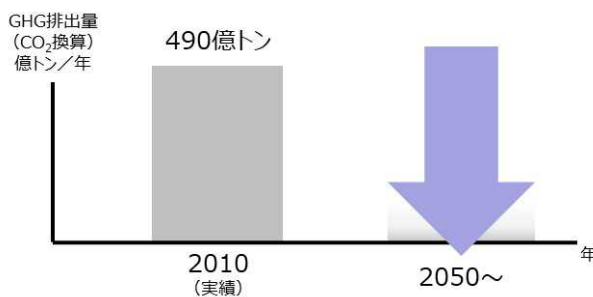
○「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和元年6月閣議決定。以下、「長期戦略」という。)において、我が国は、最終到達点として「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指し、2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減の実現に向けて、大胆に取り組むことを宣言した。これに加え、我が国の考え方・取組を世界に共有し、1.5℃の努力目標を含むパリ協定の長期目標の実現にも貢献する旨を明記した。

○ただし、パリ協定の2℃目標の実現ですら世界で年間7兆ドルの追加費用が必要との試算があり、1.5℃努力目標実現には更なる追加費用が必要となることを見込まれる。したがって、非連続なイノベーションにより社会実装可能なコストを可能な限り早期に実現することが、世界全体での温室効果ガスの排出削減には決定的に重要である。(我が国は、これまでも太陽電池のコストを250分の1にするなどのイノベーションで世界に貢献してきた。)

○今般、長期戦略に基づき策定する「革新的環境イノベーション戦略」は、

- ①16の技術課題について、具体的なコスト目標等を明記した「イノベーション・アクションプラン」、
- ②これらを実現するための、研究体制や投資促進策を示した「アクセラレーションプラン」、
- ③社会実装に向けて、グローバルリーダーとともに発信し共創していく「ゼロエミッション・イニシアティブズ」、から構成されている。

世界のカーボンニュートラル、更には、過去のストックベースでのCO₂削減(ビヨンド・ゼロ)を可能とする革新的技術を2050年までに確立することを目指し、長期戦略に掲げた目標に向けて社会実装を目指していく。



2℃目標に相当する2050年70%削減では7兆ドル/年の追加費用が必要¹⁾

1.5℃努力目標に相当する2050年100%削減には、更に対策費用が必要

1) 現状の技術の延長と比較して、世界全体の温室効果ガス(GHG: Greenhouse Gas)削減コストが最小となるよう、費用対効果の大きな革新技術から順次導入されると仮定。70%削減に比べ100%削減の費用は大幅に増加し、年間十数兆ドルに達すると考えられる。RITEのモデルによる試算。

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。

(3) 国内外の技術開発の動向と比較

欧米で CO₂ 回収及び有効利用に関する技術開発が実施されている。

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/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, 総合社社のカーボ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)) 	

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

本事業により確立する技術は、前述のとおり、我が国において温室効果ガス多排出産業でセメント業界の中において排出割合の高い製造プロセス由来の CO₂ を削減に大きく貢献することが期待できるとともに、本技術を我が国が保持することにより、世界において同一性の高いセメント製造プロセスにおいても多大なる貢献をすることが見込まれ、2020年1月に策定された「革新的環境イノベーション戦略」に合致するものである。

他方、本技術を研究開発から実証まで継続して実施するためには、多くの資金的・人的リソースが必要であること、また、事業化には長期間を要することが想定されることなどにより、民間の自発的な投資が進みにくい環境にあることから、開発が進まない環境にある。

そのため「革新的環境イノベーション戦略」のテーマと位置づけ、補助金の活用により企業の取組を促すことで、我が国が進める非連続的イノベーションの実現を目指す。

主任研究者は外部有識者で構成する「事業推進委員会」を組織し、事業の進捗状況等について、国際的視点、研究開発期間中の情勢の変化や目標の達成状況等を踏まえた評価を行うとともに、必要に応じて計画の変更等を実施します。

また、NEDOの担当は実施体制の構築、プロジェクトの進捗管理、予算配分等のプロジェクト運営に係る業務を総括します。

2.2 実施の効果（費用対効果）

本事業で開発された技術の導入による、我が国セメント産業における CO₂ 削減量を試算すると 35 万 t/年となる。欧州の二酸化炭素排出量取引市場（EU-ETS）における CO₂ の 1 トンあたりの排出枠の価格は、80€（2021 年末）である。

プロジェクト費用の総額 15.4 億円
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

【経済効果算定式】

- 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 = 80€/t-CO₂（2021 年末）
- f. 為替レート = 130 円/€（2022 年平均値）
- g. 経済効果 = d×e×f ≒ 36 億円/年

2 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

最終目標（2021 年度）

- ・ セメント工場に最適な CO₂ 分離・回収システムの構築：セメントキルン排ガスに適した経済的で効率的な CO₂ 吸収液・回収プロセスの選定
- ・ CO₂ をセメント廃棄物等に固定する技術の確立：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.以上
- ・ CO₂ 排出削減効果・固定効果の評価

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

本事業における各技術の主な目的・目標

技術領域	対象	主な目的・目標
CO ₂ 分離・回収	セメントキルン排ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント工場における最適な CO₂ 分離・回収システムの構築 ・10t/日規模の CO₂ 分離・回収の実証(運転時間：連続 100 時間以上、のべ 500 時間以上、回収 CO₂ 濃度：99%以上)
CO ₂ 有効利用・炭酸塩化	廃コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・廃コンクリートへの CO₂ 固定化およびセメント原料・再生骨材・路盤材等への再資源化技術の開発 ・加熱炭酸化処理による廃コンクリートへの CO₂ 固定化(目標：70kg-CO₂/t-cem.以上の固定化) ・廃コンクリートからのセメント原料回収(目標：微粒分中のセメントペースト含有量 70%以上)
	生コンスラッジ	<ul style="list-style-type: none"> ・生コンスラッジを用いた CO₂ 固定化およびセメント原料の一部として利用する技術開発 ・生コンスラッジを用いた CO₂ 固定化(目標：125kg-CO₂/t-cem.以上の固定化)
	コンクリート製品	<ul style="list-style-type: none"> ・新規セメント系材料を用いた炭酸化養生低炭素型コンクリート製品の開発 ・新規セメント系材料および炭酸化養生による CO₂ 削減・固定(目標 CO₂ 削減量*1：320 kg-CO₂/t-cem.)
	生コン	<ul style="list-style-type: none"> ・生コンクリートへの CO₂ 固定・封入技術の開発 ・生コンへの CO₂ 固定化(目標：流動性を確保した上で 10kg-CO₂/t-cem.以上の注入)

*1 普通ポルトランドセメントクリンカ製造時の CO₂ 排出原単位(789kg-CO₂/t-クリンカ)を基準とする

研究開発スケジュール

	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CO₂分離・回収 アミン系吸収液の調査・選定・評価 CO 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CO₂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CO ₂ 固定化条件の最適化 外熱キルンによるCO ₂ 固定化条件の確認と課題抽出 加熱炭酸化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CO 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CO₂固定化技術の開発 ラボ試験によるCO 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化実証設備の設計・設置 実証設備によるCO 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CO₂固定化技術の開発 ラボ試験によるCO 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CO 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. CO₂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		

2-1-1 化学吸収法によるセメントキルン排ガスからの CO₂ 分離・回収

(担当：太平洋セメント株式会社)

a) 目的

セメント工場内に設置した CO₂ 分離・回収設備を用いて、セメントキルン排ガスから 10t/日の CO₂ を回収し、設備の運転性・効率的な回収条件・経済性等の評価を行うことにより、セメント工場における最適な CO₂ 分離・回収システムを構築することを目的とする。

図-1 に、これまで得られた CO₂ 分離・回収実証試験の結果の一例を、図-2 に想定している CO₂ 分離・回収設備のスケールアップの概念図と現状を示す。

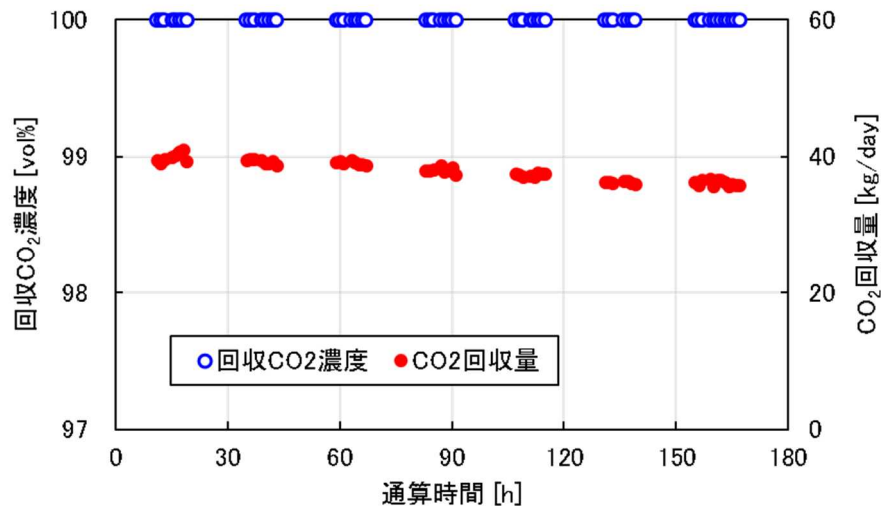


図-1 CO₂分離・回収実証試験により得られた運転時間と回収CO₂濃度・CO₂回収量の関係
(環境省委託事業:環境配慮型CCS事業)

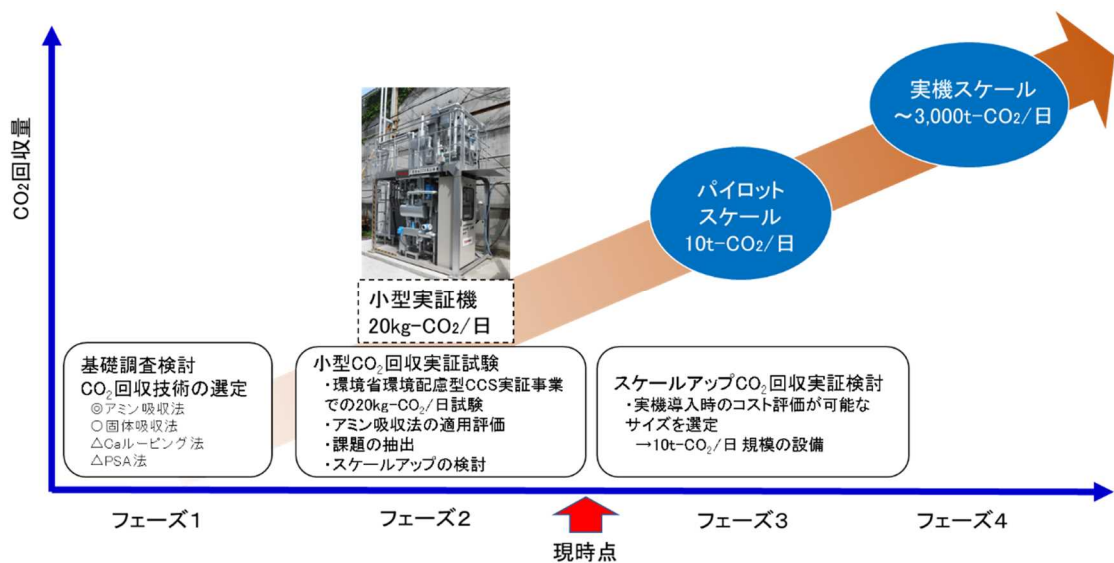


図-2 CO₂分離・回収設備のスケールアップの概念図

b)目標

2020年度

- ・ 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の設計・建設

2021年度

- ・ 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
(運転時間:連続100時間以上、のべ500時間以上、回収CO₂濃度:99%以上)
- ・ 実機スケール設備に向けた課題抽出・経済性評価

2-1-2①廃コンクリートによる CO₂ 吸収及び建設資材・セメント原料としての利用技術開発

(担当：太平洋セメント株式会社、東京大学、早稲田大学)

a)目的

本検討は、セメントキルン排ガスから分離・回収した CO₂ を、建設副産物である廃コンクリートに含まれるセメントペーストに吸収させ炭酸塩として固定化するとともに、それらの処理物をセメント原料や再生骨材・路盤材等の建設資材に再資源化できる技術を開発することを目的とする。

本検討は、廃コンクリートを用いた i)加熱炭酸化処理による CO₂ の炭酸塩化技術、ii)セメントペースト・骨材の分離回収技術の二つで構成され、各々を並行して検討を進める。

b)目標

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

(目標：70kg-CO₂/t-cem.以上の固定化、自主目標：100kg-CO₂/t-cem.以上の固定化)

ii) セメントペースト・骨材分離回収技術

・回収物の品質評価

(目標：微粒分中のセメントペースト含有量 70%以上、再生骨材・路盤材の物理特性、溶出特性等の規格・基準値を満足)

2-1-2②生コンスラッジを用いた CO₂ 固定化技術の開発

a)目的

本検討は、セメントキルン排ガスから分離・回収した CO₂ を、生コン工場から発生するスラッジを用いて炭酸塩化するとともに、生成した炭酸塩鉱物をセメント原料の一部として利用する技術を開発することを目的とする。

本技術は、生コンスラッジをセメント製造工程に組み込むことにより、より大きなスラッジの受け入れ能力を有することが従来技術との相違点である。CO₂ の固定化は、スラリー化した生コンスラッジに CO₂ を吹き込み、炭酸塩鉱物を生成することによる。生成した炭酸塩鉱物のスラリーをセメントの製品仕上げ(粉碎)工程に組み込み、最終製品であるセメントの一部として利用することにより、産業廃棄物の再資源化とセメント製造時の CO₂ 排出削減の両者を実現できる新しいセメント製造プロセスの構築につなげることを目指す。

b)目標

・実証設備による生コンスラッジを用いた CO₂ 固定化条件(CO₂ 量、固液比など)の最適化

(目標：125kg-CO₂/t-cem.以上の固定化)

・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(目標：現行品同等の品質の確保、～60t-cem./h のセメント生産スケール)

2-1-2③低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の開発

a)目的

本検討は、製造時の CO₂ 排出量が少ない新規セメント系材料を用い、セメントキルン排ガスから分離・回収した CO₂ と反応させることにより硬化する低炭素型コンクリート製品を開発することを目的とする。

開発する新規セメント系材料は、通常のポルトランドセメントと比べてカルシウム含有量が少なく低温で焼成できることが特長であり、製造時の脱炭酸およびエネルギー消費にともなう CO₂ 排出量を大幅に削減でき、これまで蓄積してきたクリンカ焼成技術を応用した材料である。また、同材料は、CO₂ と反応して硬化する性質を有していることから、密閉槽内でセメントキルン排ガスから分離・回収した CO₂ で炭酸化養生するコンクリート製品に適用することにより、セメント製造時に発生する CO₂ を固定化することができる。図-3 に、新規セメント系材料の CO₂ 削減の概念図を示す。

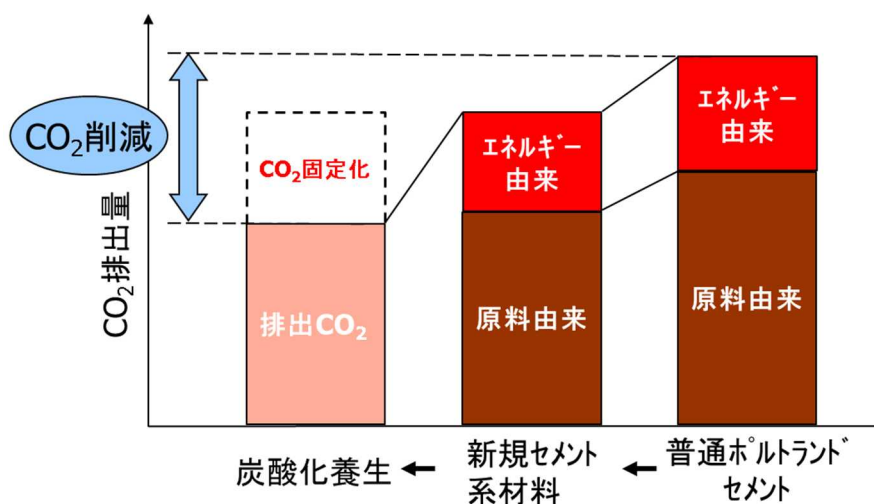


図-3 本技術による CO₂ 削減のイメージ

2-1-2④生コンへの CO₂ 固定化技術の開発(担当：太平洋セメント株式会社)

a)目的

セメントキルン排ガスから分離・回収した CO₂ を、生コンクリート(以下、生コン)に注入しコンクリート中に固定・封入する技術を開発することを目的とする。

生コンはセメントの主たる用途であり、国内セメント販売数量およそ 40,000 千 t のうち、その約 7 割が生コンの製造に用いられている。そのため、バリューチェーンの中で最も CO₂ 固定化ポテンシャルを有した分野として期待される。これまで、生コンに直接 CO₂ を注入することにより、炭酸塩としての固定化および強度発現性の向上を図り、単位セメント量を減じる技術が提案されている 1)。これは、コンクリートの練混ぜ水に溶解したセメントのカルシウムイオンと、注入された CO₂ が反応し微細な炭酸カルシウムを生成することにより、その後のセメントの水和反応を促進するというメカニズムである。ただし、実際の CO₂ の注入量は最大でも単位セメント量の 0.5%程度に限られる 2)。これは、炭酸カルシウムの生成が発熱反応であることから、CO₂ 注入量が増加するとコンクリート温度が上昇し、流動性が低下するためである。また、注入したものの溶解しなかった CO₂ は、固定化されずに大気中に逸散していく。

本技術は、これらの課題に対し超微細気泡(数十 nm～1μm)の CO₂ を注入することにより解決しようとするものである。超微細気泡は、通常のサイズの気泡と比べ、長時間液体中に残存できる特徴を有している。そのため、練混ぜ時の CO₂ の固定化を促進できる可能性がある。また、超微細気泡を導入された生コンは、流動性が向上する効果が確認されており、許容される注入 CO₂ 量の増加につながる可能性がある。さらに、製造後の生コンに、数百μm サイズの CO₂ を混合・封入し、軽量盛土等に適用される気泡コンクリート(年間 20～36 万 m³ の国内実績)への適用性についても検討する。

b)目標

- ・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
(目標：流動性を確保した上で 10kg-CO₂/t-cem.相当以上の注入量)
- ・コンクリートの硬化性能の評価
(目標：基準とするコンクリートと同等以上の強度特性)

2-1-3CO₂ 排出削減効果・固定効果の評価（担当：太平洋セメント株式会社）

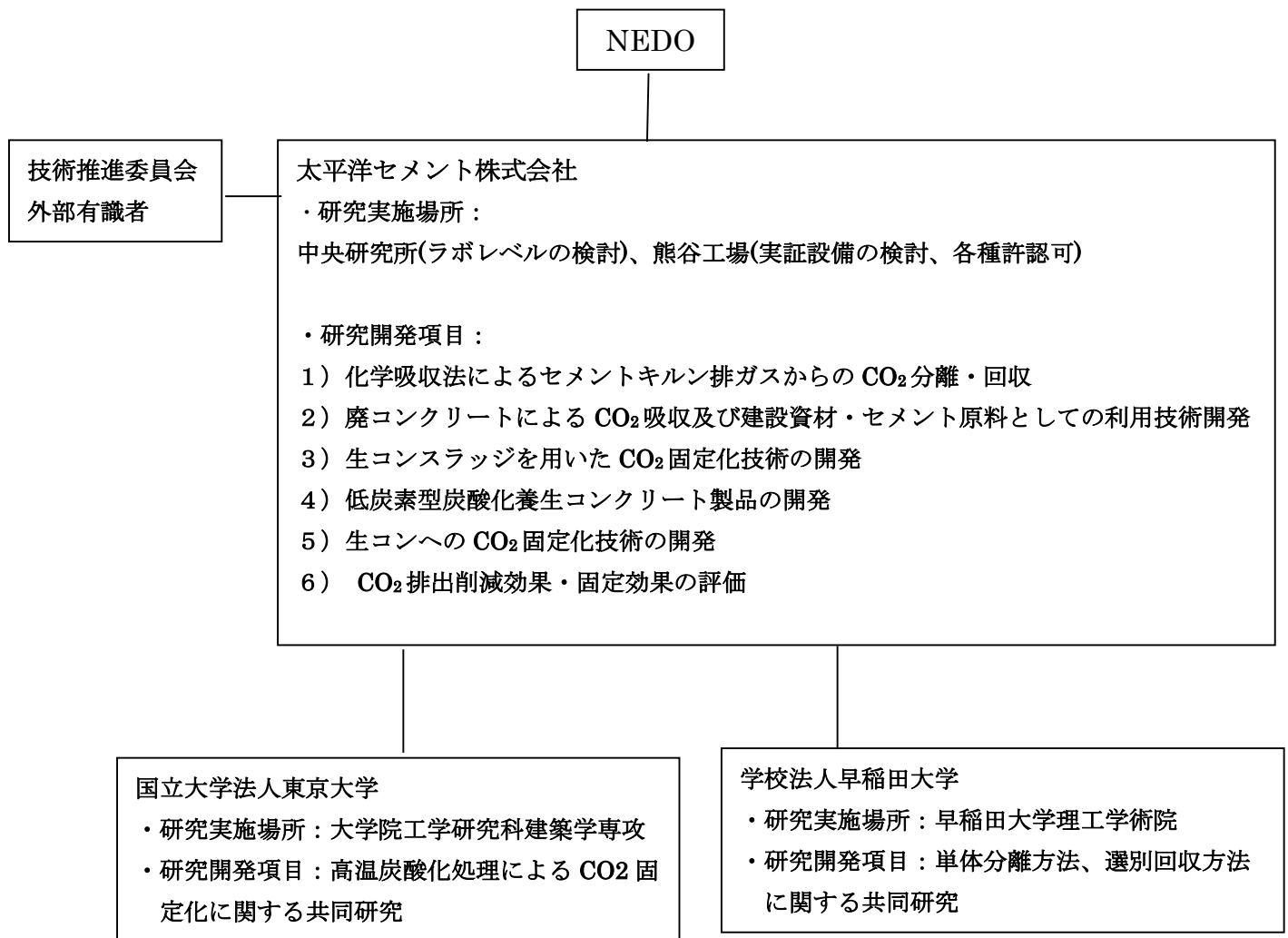
a)目的

上述の①～⑤の CO₂ 分離・回収および有効利用・炭酸塩化技術を統合し、本事業で開発した炭素循環型セメント製造プロセスの CO₂ 削減効果について、実証試験結果をベースにモデル工場を設定し、CO₂ 収支の試算や課題抽出等を行うことにより、社会実装の実現性について示すことを目的とする。

b)目標

- ・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

2-2 研究開発の実施体制



2-3 研究開発の運営管理

2-3-1 研究開発の進捗管理

N E D O 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、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

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。

技術推進委員会の開催

第 1 回技術推進委員会の開催概要

日時	2020 年 10 月 24 日 13:00～16:10 (15:10～16:10 見学)
場所	太平洋セメント(株) 熊谷工場
出席者	技術推進委員 (3 名)、経済産業省 (2 名)、NEDO (4 名)、共同研究者 (2 名)、助成事業支援業務外注会社 (2 名)、太平洋セメント (17 名)
内容	- 技術推進委員会委員長の選出。 - 助成事業の進捗と今後の計画に関する報告、議論。 (助成事業の全体概要と計画、ラボ試験の進捗など。報告：3 件)
併せて実施した 見学	熊谷工場セメント製造プラントおよび実証試験設備導入予定地の見学

第 2 回技術推進委員会の開催概要

日時	2021 年 4 月 12 日 14:00～17:10 (14:00～15:20 見学)
場所	太平洋セメント(株) 中央研究所
出席者	技術推進委員 (4 名)、経済産業省 (2 名)、NEDO (3 名)、共同研究者 (3 名)、助成事業支援業務外注会社 (3 名)、太平洋セメント (15 名) 《Web 会場》太平洋セメント(株) 本社、熊谷工場、中央研究所
内容	助成事業の進捗と今後の計画に関する報告、議論。 (実証試験設備の導入・工事等の進捗状況、ラボ試験の結果と進捗など。報告：4 件)
併せて実施した 見学	開発技術のラボ試験設備見学および試験のデモンストレーション

第 3 回技術推進委員会の開催概要

日時	2021 年 9 月 17 日 13:30～16:30
場所	太平洋セメント(株) 本社
出席者	技術推進委員 (3 名)、経済産業省 (2 名)、NEDO (2 名)、共同研究者 (2 名)、助成事業支援業務外注会社 (3 名)、太平洋セメント (14 名) 《Web 会場》太平洋セメント(株) 本社、熊谷工場、中央研究所
内容	助成事業の進捗と今後の計画に関する報告、議論。 (実証試験設備の現地設置状況、ラボ試験および実証試験の結果と進捗など。報告：4 件)

第4回技術推進委員会の開催概要

日時	2022年2月7日 13:00～16:30（13:00～14:00 見学）
場所	太平洋セメント(株) 熊谷工場
出席者	技術推進委員（3名）、経済産業省（2名）、NEDO（3名）、共同研究者（2名）、助成事業支援業務外注会社（2名）、太平洋セメント（9名） 《Web会場》太平洋セメント(株) 本社、熊谷工場、中央研究所
内容	助成事業の進捗と成果に関する報告、議論。 （事業全体計画に対する進捗状況、実証試験の結果と助成事業の成果など。報告：4件）
併せて実施した見学	実証試験設備の見学

2-4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2-4-1 知的財産権等に関する戦略の妥当性

【基本戦略】

- ◆ 知財として確保する方が有利な技術については積極的に特許として出願する。
- ◆ ノウハウとして保有する方が有利な技術は出願しない。
- ◆ 競合技術の出願状況を定期的に調査し、対策を検討する。
- ◆ 「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条（委託の成果に係る知的財産権の帰属）の規程等に基づき、原則として、事業成果に関わる知的財産権は全て委託先に帰属
- ◆ 新規に開発、取得した知財は基本的にオープンとする

	非競争域	競争域
公開	システム要件 モデル構築手法 など	機械装置類の開発 システム開発 など
非公開	事業者の独自技術に基づいたものであり、かつ その事業者が当該技術をクローズ（秘匿）しているもの	

【戦略的な特許取得活動】

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

3. 情勢変化への対応

情勢	対応
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。	グリーンイノベーション基金事業の基本方針に基づき「CO ₂ 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CO ₂ 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。

3 研究開発成果について

3-1. 事業全体の成果

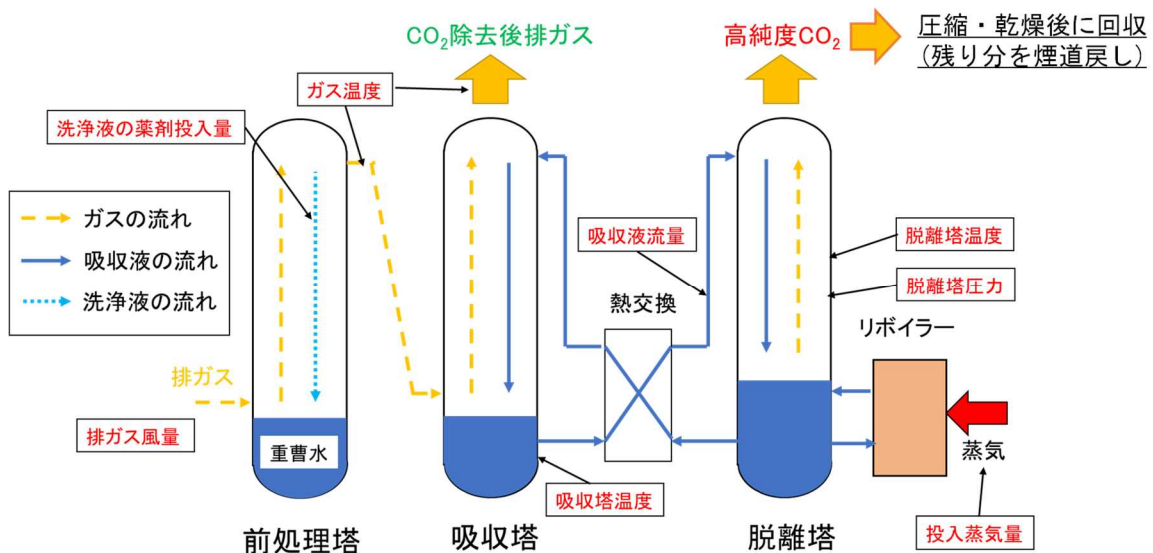
本プロジェクトにおいて掲げた研究テーマについては、以下に個別成果の趣旨記載のとおり、それぞれの研究開発項目の目標値を達成した。

- (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導入。連続運転による適用検証を実施
- (2) 回収した CO₂ を廃コンクリートに短時間で固定、ならびに 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・炭酸塩化技術の開発を行い、上記成果も含めて総合的なカーボンサイクルの実現に資する要素技術を確立

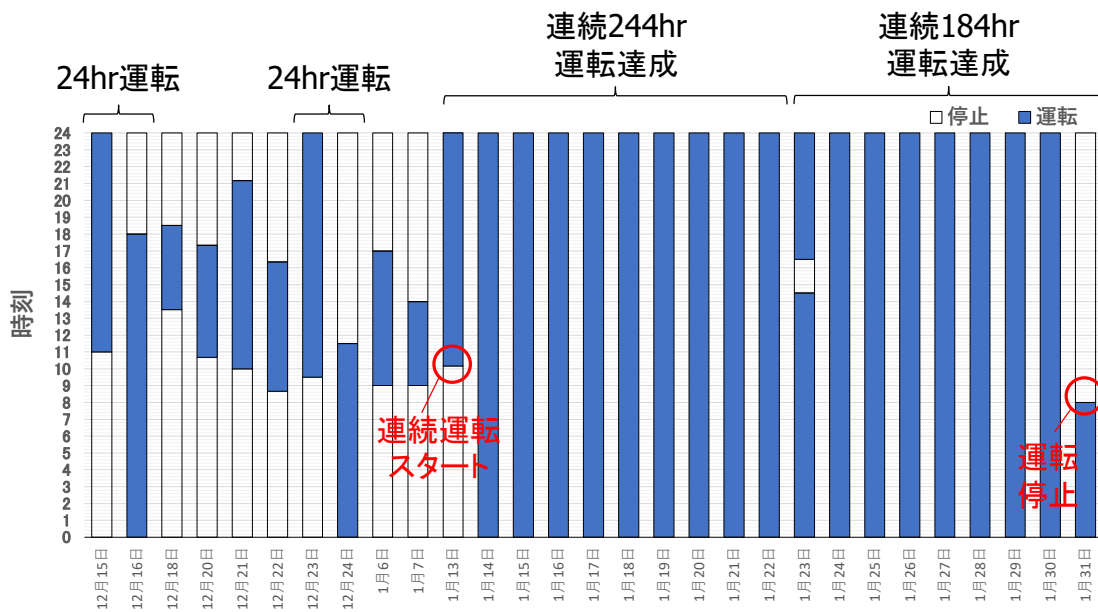
3-2. 研究開発項目毎の成果

3-2-1 化学吸収法によるセメントキルン排ガスからの CO₂ 分離・回収

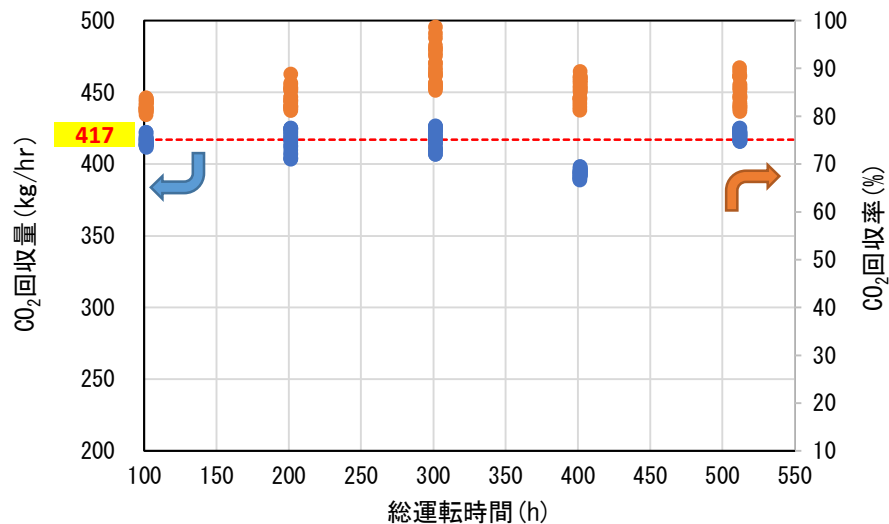
ラボ試験においてセメントキルン排ガスに酸性ガスとして多く含まれる NO_x の影響について検証し、NO₂ 単独ではアミン系吸収液の CO₂ 吸収および脱離に与える影響が殆ど無いことを確認した。10t-CO₂/day 規模のパイロットプラント(英国 CCL 社製)による実証試験では、CO₂ 回収量および回収 CO₂ 濃度の目標性能(417kg/hr 以上、99%以上)および運転目標(運転時間：連続 100 時間以上、延べ 500 時間以上、回収 CO₂ 濃度：99%以上)を達成し、本助成事業で導入したパイロットプラントと CO₂ 吸収液がセメントキルン排ガスにも適用できることを実証した。



CO₂ 分離・回収プロセスのフロー概要



CO₂分離・回収パイロットプラントの運転時間



CO₂回収率・回収量

長時間運転におけるCO₂回収率、回収量および回収CO₂濃度の経時変化を示す。概ね安定した高純度CO₂回収 (CO₂回収量：平均412.8kg/hr、CO₂回収率：平均85.6%、回収CO₂濃度：平均99.90%)が確認されたことから、当実証試験において運転時間が及ぼすCO₂分離・回収性能への影響は顕在しなかったと考えられる。しかし、より長期間に亘る吸収液の耐久性・CO₂回収性能の評価を行うと共に、CO₂回収率の更なる向上・CO₂回収エネルギー低減に向けた運転最適化の検討は今後の課題である。

3-2-2①廃コンクリートによる CO₂ 吸収及び建設資材・セメント原料としての利用技術開発

CO₂ 固定化技術では、廃コンクリートに含まれるセメントペースト硬化体に CO₂ を吸収させ、炭酸塩として固定化する技術の開発を目的として、加熱炭酸化処理の検討を行った。ラボ試験では段階的にスケールアップの検討を行い、各段階で CO₂ 固定化量の NEDO 目標を全て達成した。実証試験においても処理条件の最適化によって CO₂ 固定化量の NEDO 目標 (70kg/t-cem) を達成し、排ガスから分離回収した CO₂ の有効利用方法として廃コンクリートの活用が有効であることを示した。

セメントペースト・骨材分離回収技術では、廃コンクリートからセメントペースト分が濃縮したセメント原料を回収する技術の研究開発を行い、従来の再生骨材製造時の副産微粉に比べ、高品位 (セメントペースト含有率 70% 以上) のセメント原料回収を実現した。

下表に加熱炭酸化処理による CO₂ 固定量を示す。処理温度 120℃において、NEDO 目標である 70kg-CO₂/t-cem を達成した。CO₂ 固定量は 75kg -CO₂/t-cem であった。これは、一般大気中に 33 年間曝されたコンクリートの CO₂ 固定量の約 50% に相当する。90℃の固定量が小さかった理由は、加熱温度が低いため CO₂ の拡散速度が小さいこと、水蒸気が露点に達し、発生した水滴が廃コンクリート内部への CO₂ の拡散を阻害したためと考えられる。一方、140℃は吹込み水蒸気量が 90、120℃と同量であるため相対湿度が小さくなり、コンクリート内部が乾燥しやすく、炭酸化に必要となる水分が不足したためと考えられる。CO₂ と共に水蒸気の吹込みをしない条件の CO₂ 固定量は、63.7kg -CO₂/t-cem であった。水蒸気吹込み有りとは比べ若干減少したが、水蒸気の有無よりも処理温度の影響が大きい結果となった。以上から、CO₂ 固定化条件の最適化により NEDO 目標である 70kg-CO₂/t-cem を達成した。

CO₂ 固定量

試験条件		CO ₂ 固定化量※ (kg-CO ₂ /t-cem)
処理温度	水蒸気の有無	
90℃	あり	31.3
120℃	あり	75.9
	なし	63.7
140℃	あり	34.9

また、炭酸化の進行を視覚的に確認するために試料断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。図 3-1 にフェノールフタレイン溶液噴霧後の試料断面を示す。処理前は断面全体が赤色に呈色しているのに対し、処理後は表層から炭酸化が進行していることが確認された。

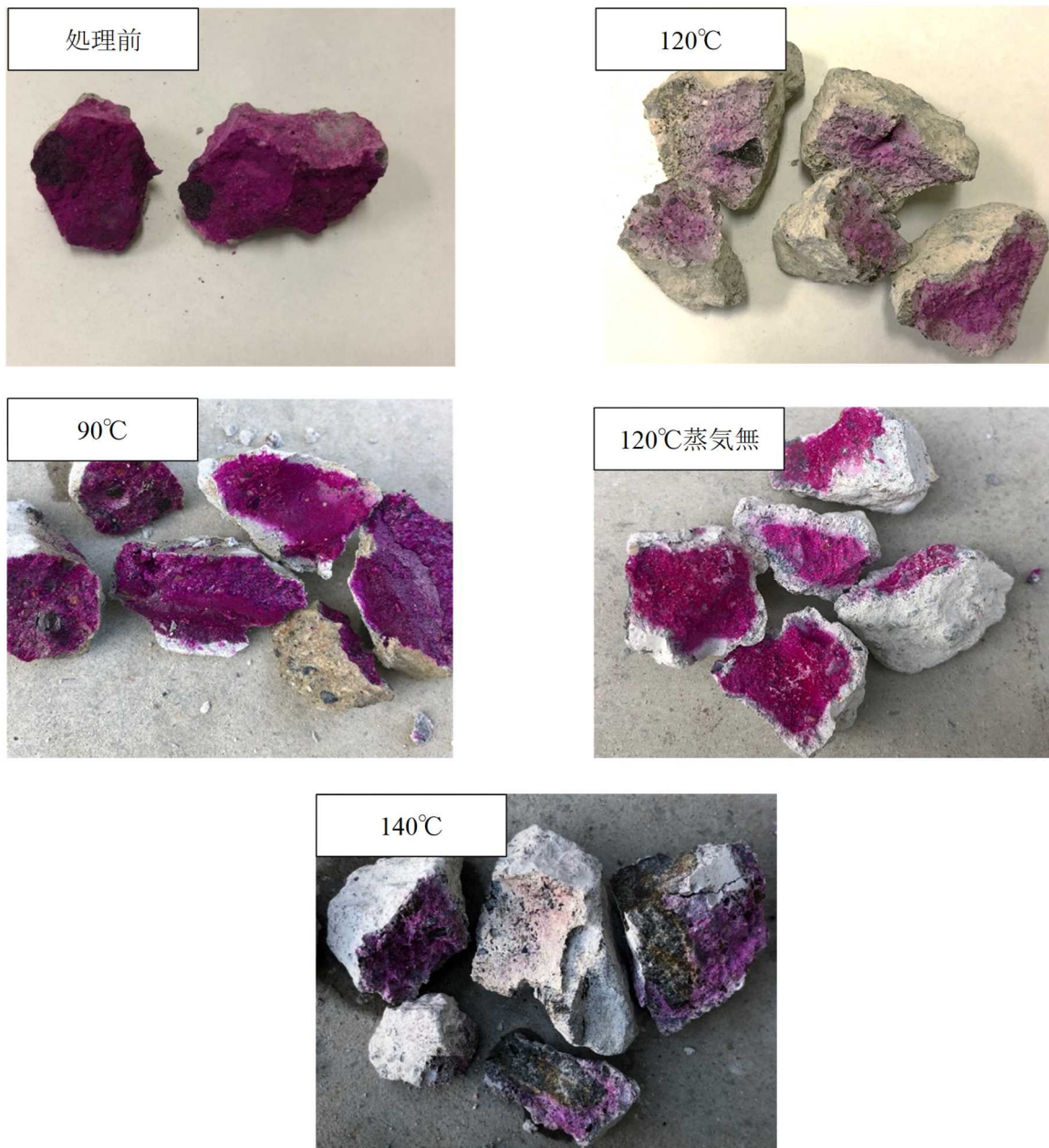


図 3-1 フェノールフタレイン溶液噴霧後の試料断面

セメントペースト・骨材分離回収技術において設定した数値目標に対して、研究開発で得られた目標達成値を表に示す。本研究開発ではラボ試験、実証試験において、条件最適化を行う事で設定目標数値を達成することができた。

目標達成値

実施項目	目標値	目標達成値
ラボ試験	微粒分中のセメントペースト含有量 70%以上	テーブル選別 84% 遠心力選別 83%

実証試験	微粒分中のセメントペースト含有量 70%以上	テーブル選別 82% 遠心力選別 74%
------	------------------------	-------------------------

残渣の有効利用方法の検討においても、物理的特性の評価を実施した結果、再生粗骨材 M～H、再生細骨材 M 相当の吸水率、絶乾密度を示し、再生骨材としての適用可能性を確認した。再生骨材以外の用途として、再生砂としての可能性を見出し、六価クロム溶出が環境基準以下であることを確認した。以上より、本研究で設定した目標をすべて達成することができた。

3-2-2②生コンスラッジを用いた CO₂ 固定化技術の開発

生コン工場から発生するスラッジに CO₂ 固定化するとともに、生成した炭酸塩鉱物をセメント混合材として利用する技術の開発を行った。得られた主な成果は以下の通りである。

- ・ラボスケールの CO₂ 固定化試験にて、重要因子の抽出を行うとともに、最適条件を決定した。最適である CO₂ 吹込み速度が低い条件では、CO₂ 固定量と CO₂ 固定効率が両立でき、CO₂ 固定量は 371 kg/t-cem. が得られた (目標 : 250 kg-CO₂/t-cem. 以上)。
- ・ラボスケールの炭酸塩化スラリー混合粉砕試験を行い、炭酸塩化スラリーの添加がセメント粉砕工程に大きな影響を及ぼさないことを確認した。
- ・ラボスケールで試製した炭酸塩化スラリー添加セメントの品質評価を行い、炭酸塩化スラリーの添加率が 2% 以下であれば、セメント品質に及ぼす影響を抑制できることが判明した。
- ・実証設備の CO₂ 固定化試験にて、最適条件の決定を行った。ラボスケールと同様に、CO₂ 吹込み速度が低い条件では、CO₂ 固定量と CO₂ 固定効率が両立でき、CO₂ 固定量は 333 kg/t-cem. が得られた (目標 : 125 kg-CO₂/t-cem. 以上)。
- ・太平洋セメント(株)熊谷工場の実機セメント粉砕ミルを用いて混合粉砕試験を行い、炭酸塩化スラリーの添加がセメント粉砕工程に大きな影響を及ぼさないことを確認した。
- ・実証設備で試製した炭酸塩化スラリー添加セメントの品質評価を行い、炭酸塩化スラリーの添加率が 0.5% であれば、現行品同等の品質が確保できることを確認した。

3-2-2③低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の開発

製造時の CO₂ 排出量が少ない新規セメント系材料を用い、CO₂ と反応させることにより硬化する低炭素型コンクリート製品を開発することを目的とし、ラボ試験および実証試験を実施した。コンクリート製品は普通配合と透水配合の 2 種類のインターロッキングブロックを対象とし、新規セメント系材料の設計、テストキルンによる製造、コンクリート製品の配合選定、養生条件の最適化、炭酸化養生装置の設計・設置、コンクリート製品の実証製造および敷設試験を実施した。その結果、JIS 規格を満足し、供用後の路面性状についても市販品と同等の性能を有する製品を製造することができた。また、CO₂ 削減量については、目標の 320 kg-CO₂/t-cem. を達成しており、規格を満足する品質かつ CO₂ を大幅に削減できる低炭素型コンクリート製品が実規模で製造できることが実証された。なお、本実証における新規セメント系材料の製造には、実際の産業廃棄物を使用していないが、原料からの脱炭酸を生じない廃棄系 Ca 原料を用いた場合、CO₂ 排出量がゼロとなる見込みを得ている。また、同項で既述した通り、実証製造の対象にインターロッキングブロックを選定した理由のひとつに炭酸化養生にともなうセメント硬化体の pH 低下により内部の鋼材が

腐食することを避けることがあげられ、本技術は無筋コンクリート製品にのみ適用できるものである。したがって、今後は鉄筋コンクリート製品への適用が課題となる。

3-2-2④生コンへのCO₂固定化技術の開発

生コンおよび軽量盛土へのCO₂注入・固定化技術の開発を行った。生コンへのCO₂注入・固定化技術の開発では、生コンへのCO₂注入方法として、①練混ぜ水へCO₂注入、②ドライアイスによるCO₂注入、③セメントスラリーへのCO₂注入（CO₂溶解スラリー）による手法を検討した。CO₂固定量およびCO₂固定率の評価を行い、実証試験ではCO₂溶解スラリーによるコンクリート製造技術を採用した。生コン工場の実機プラントでコンクリートの製造を行った結果、一般的なコンクリートと同等の流動性を確保した上で、CO₂は最大22.3kg-CO₂/t-cemを固定できることが確認された。

軽量盛土へのCO₂注入・固定化技術の開発では、生コンと同様にCO₂溶解スラリーを活用した方法に加え、軽量盛土が多孔質な組織であることに着目し、硬化体に直接的にCO₂を吹き込むことを検討した。その結果、構造体の内部にまでCO₂を浸透させることができ、固定量は189kg-CO₂/t-cemとなった。

3-2-3CO₂排出削減効果・固定効果の評価

CO₂有効利用のための各個別技術につきCO₂削減効果の評価を行った。また、各個別技術を組み合わせたモデル工場を設定し、本助成事業の技術が実用化された場合の将来的なCO₂削減効果（ポテンシャル）を見積もった。モデル工場による評価では、技術の適用によるCO₂削減率は、モデル工場のCO₂排出量に対し、現状（現在の電力や輸送のCO₂排出係数）では1.3%の増加となり、現時点ですぐにすべての技術を導入した場合には必ずしもCO₂排出量の削減には繋がらない可能性が示唆された。一方、電力や輸送のカーボンフリー化が進展した場合にはCO₂削減効果が得られるようになり、電力・輸送のCO₂排出係数が2030年目標値相当となった場合には1.3%、カーボンフリー化した場合（2050年）には13.1%の削減効果が得られるものと見込まれた。また、実証試験後の検討において、プロセスの改善などによってさらにCO₂削減の余地がある技術も認められていることから、本助成事業にて開発した技術は、将来的には高い効果が得られる技術であることが示された。

表-1 各個別技術の番号と名称

技術番号	技術の名称
技術①	CO ₂ 分離・回収
技術②-1	廃コンクリートへのCO ₂ 固定化
技術②-2	廃コンクリートのカルシウム分離・セメント原料化
技術②-3	コンクリートスラッジへのCO ₂ 固定化
技術②-4	低炭素型炭酸化養生コンクリート製品
技術②-5	生コンクリートへのCO ₂ 固定化

表-2 CO₂排出量の評価において適用プロセスとリファレンスプロセスで量を統一した項目
(機能単位)

技術番号	技術の名称
技術②-1	受け入れる廃コンクリートの量 (=廃コンクリート最終製品量(体積として同一))
技術②-2	受け入れる廃コンクリートの量
技術②-3	受け入れるコンクリートスラッジの量

技術②-4	コンクリート製品に使用するセメントの量 (=コンクリート製品量)
技術②-5	生コンクリートにへの CO ₂ 固定化 (=生コンクリート量)

表3 モデル工場の CO₂ 固定量と削減量
(本助成事業で開発した技術の導入による CO₂ 削減ポテンシャル)

	CO ₂ 固定量(利用量) (t-CO ₂ /日)	CO ₂ 削減量 (t-CO ₂ /日) (※)		
		現状	2030 年	2050 年
技術②-1	91.0	+70.1	+51.3	-91.0
技術②-2	91.0	+183.0	+134.5	-116.6
技術②-3	11.8	-3.0	-4.7	-13.6
技術②-4	168.0	-227.5	-228.5	-267.7
技術②-5	87.7	+4.6	-9.9	-82.0
合計	449.6	+27.1	-57.4	-571.0

表4 モデル工場の CO₂ 削減率
(本助成事業で開発した技術の導入による CO₂ 削減ポテンシャル)

	CO ₂ 削減率 [対モデル工場排出量] (%) (※)		
	現状	2030 年	2050 年
技術②-1	+1.6	+1.2	-2.1
技術②-2	+4.2	+3.1	-2.7
技術②-3	-0.1	-0.1	-0.3
技術②-4	-5.2	-5.3	-6.2
技術②-5	+0.1	-0.2	-1.9
合計	+0.6%	-1.3%	-13.1%

※ CO₂ 排出量が増加したものを“+”、減少したものを“-”として表記。

- (1) 技術②-3、②-4 では、現状から CO₂ 削減効果があり、また将来的に電力や輸送のカーボンフリー化が進むにしたがって CO₂ 削減効果はより大きくなるものと見積もられた。
- (2) 技術②-1、②-2、②-5 では、開発した技術の適用によって現状では CO₂ 排出量が増加またはほとんど変わらない結果となり、現時点ですぐに技術を導入しても効果は得られにくい可能性があると考えられた。一方で、将来的に電力や輸送の CO₂ 排出係数が低下（カーボンフリー化が進展）した際には、CO₂ 削減効果が大きくなり、十分な効果が得られることが見込まれた。
また、モデル工場による評価では、以下の結果が得られた。
- (1) モデル工場の想定 CO₂ 排出量 4,348 t/日に対し、技術の適用による CO₂ 削減量は、現状では 27.1 t/日の増加となり、現時点ですべての技術を導入した場合には必ずしも CO₂ 排出量の削減には繋がらない可能性が示唆された。一方、電力や輸送のカーボンフリー化が進展した場合には CO₂ 削減効果が得られるようになり、2030 年では 57.4 t/日（年間 300 日の稼働を想定した場合、約 17,000 t/年）、2050 年では 571 t/日（約 170,000 t/年）の削減量となるものと見込まれた。

(2) モデル工場の CO₂ 排出量に対する削減割合としてみた場合には、現状では 0.6 %増加するものの、2030 年では 1.3 %、2050 年では 13.1 %の削減効果が得られるものと見込まれた。

4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

4-1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて





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」

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し、販売等開始）

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)

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、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な応じた大型化

添付資料

●プロジェクト実施方針：

P 2 0 0 1 3

2021 年度実施方針

環境部

1. 件名：炭素循環型セメント製造プロセス技術開発
2. 根拠法

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第三号、第九号

3. 背景及び目的・目標及び内容

地球規模の課題である気候変動問題を解決するためには、クリーンエネルギー技術の開発と実用化に向けた抜本的なコストダウンが必要である。日本としても、世界の脱炭素化を牽引すべく、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（2019年6月閣議決定）において、2050年までに80%の温室効果ガス削減目標を掲げるとともに、非連続なイノベーションの推進を表明した。また、2019年10月の「グリーンイノベーション・サミット」での議論を踏まえ、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。同戦略において、温室効果ガス削減量が大きく、日本の技術力による大きな貢献が可能な39テーマのひとつとして、「CO₂を原料とするセメント製造プロセスの確立」が設定された。

我が国のセメント産業は、日本の温室効果ガス総排出量の約4%に相当する二酸化炭素を排出している産業であり、その排出削減対策は重要な課題となっている。このうちの約6割を占める非エネルギー起源二酸化炭素については、セメントの中間製品であるクリンカを製造するプロセスで原料（石灰石）から化学反応によって必然的に発生するものである。そのため、クリンカを製造する限り、その排出削減は困難であり、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションが求められている。

本事業では、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションを創出するため、セメント工場及び近隣地域において、セメント製造工程のCO₂を再資源化し、セメント原料や土木資材として再利用する技術を開発する。

[助成事業]

最終目標（2021年度）

- ・ セメント工場に最適なCO₂分離・回収システムの構築：セメントキルン排ガスに適した経済的で効率的なCO₂吸収液・回収プロセスの選定
- ・ CO₂をセメント廃棄物等に固定する技術の確立：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.以上

アウトカム目標（2030年度）

- ・ 社会実装の初期段階として、2030年度までに、国内のセメント工場30ヶ所（2019年4月現在）の1割に相当する3工場に開発技術の導入を目指す。

4. 実施内容および進捗状況

4.1 2020 年度（助成）事業内容

セメントキルン排ガス中 CO₂ を分離・回収し、セメント工場及び近隣地域において廃コンクリートや生コンスラッジを用いて炭酸塩として固定化後、セメント原料（石灰石代替）や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・実証開発等に着手した。

2020 年度は、以下に例示するような一連のセメント製造・使用プロセスにおける、CO₂ の分離・回収、再資源化、固定化のための技術開発を実施した。

- 1) セメントキルン排ガスからの CO₂ 分離・回収パイロット実証
10 t-CO₂/日規模のパイロットプラント設計・製造、吸収液調査・ラボ試験等
- 2) 再資源化による CO₂ 排出削減・CO₂ 固定化研究開発
以下の研究開発に関わる試験設備の設計・製造、炭酸化条件の最適化ラボ試験等
 - 2-1) セメント廃棄物（生コンスラッジ、廃コンクリート等）の再資源化（セメント原料化、土木資材化）による CO₂ 排出削減
 - 2-2) セメント製品（生コン、コンクリート製品等）への CO₂ 固定

5. 事業内容

5.1 2021 年度（助成）事業内容

2020 年度に引き続き、以下の技術開発を実施する。

- 1) セメントキルン排ガスからの CO₂ 分離・回収パイロット実証
10 t-CO₂/日規模のパイロットプラント設計・製造、吸収液調査・ラボ試験等
- 2) 再資源化による CO₂ 排出削減・CO₂ 固定化研究開発
以下の研究開発に関わる試験設備の設計・製造、炭酸化条件の最適化ラボ試験等
 - 2-1) セメント廃棄物（生コンスラッジ、廃コンクリート等）の再資源化（セメント原料化、土木資材化）による CO₂ 排出削減
 - 2-2) セメント製品（生コン、コンクリート製品等）への CO₂ 固定

6. その他重要事項

(1) 評価の方法

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を実施する。

事後評価を 2022 年度に実施する。

(2) 運営・管理

必要に応じて技術検討委員会を実施し、外部有識者の意見を適切に反映し、着実な運営を図る。

(3) 継続事業に係る取扱いについて

助成先は前年度と変更はない。

2020 年度助成先：太平洋セメント株式会社

(4) 標準化施策等との連携

得られた研究開発成果については、知的基盤整備事業との連携を図ることとし、データベースへのデータの提供を必要に応じて行う。

(5) その他

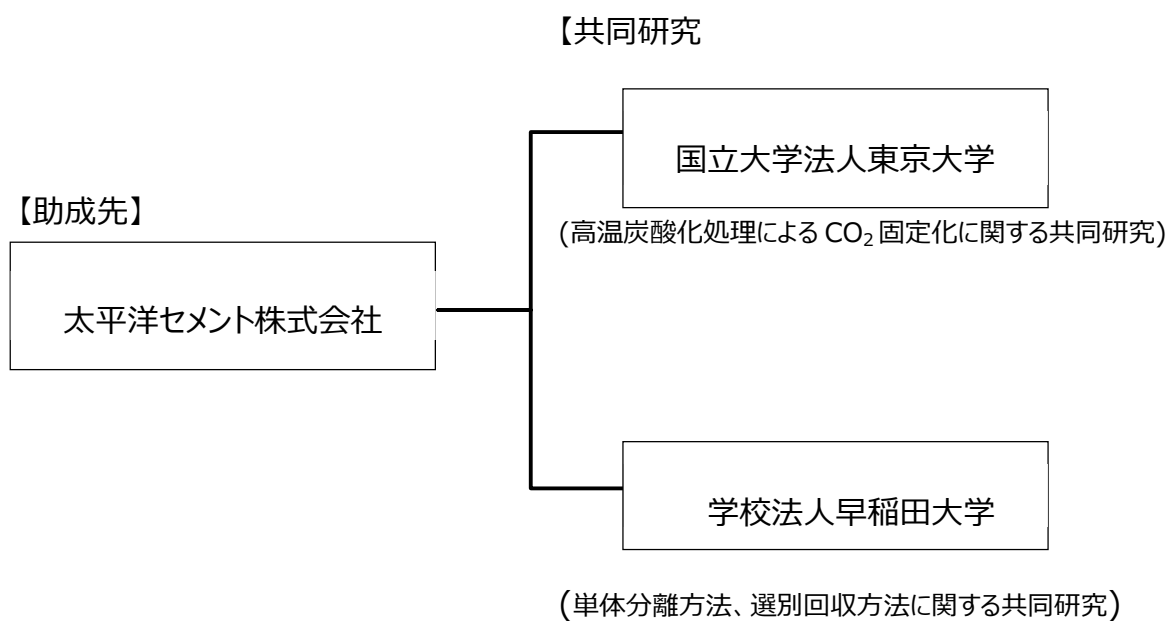
本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成や中堅・中小・ベンチャー企業等を支援することとする。

7. 改訂履歴

(1) 2021年2月 制定

以上

(別紙) 研究実施体制図



●プロジェクト開始時関連資料：

本事業を開始するに際し、経済産業省製造産業局素材産業課にて事前評価を実施し、研究開発項目に反映した。

研究開発事業に係る技術評価書（事前評価）

事業名	革新的環境イノベーション戦略加速プログラム 【新規テーマ：炭素循環型セメント製造プロセス技術開発事業】	
担当課室	製造産業局素材産業課	
事業期間	令和2年度～令和3年度	
補正予算額	令和2年度 1,700（百万円）	
会計区分	エネルギー対策特別会計	
実施形態	国（交付金）→ NEDO（1/2 補助） → 民間事業者	
PJ / 制度	研究開発課題（プロジェクト）	
事業目的	<p>地球規模の課題である気候変動問題を解決するためには、クリーンエネルギー技術の開発と実用化に向けた抜本的コストダウンが必要。</p> <p>日本としても、世界の脱炭素化を牽引すべく、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年6月閣議決定）において、『2050年までに80%の温室効果ガス削減を目標とすること』、『非連続的なイノベーションを創出するために革新的環境イノベーション戦略を策定すること』等を表明。</p> <p>また、2020年1月に「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。</p> <p>本事業では、革新的環境イノベーション戦略を加速化させるため、CO₂排出量の多いセメント産業において、当該戦略の中に位置づけられているカーボンリサイクル技術の開発による原料化や再資源化するセメント製造プロセスの開発を実施する（当該戦略のCO₂吸収型コンクリートの開発他は当該事業の対象ではない。）。</p>	
事業概要 (アキティビティ)	<p>上記の事業目的を達成するため、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開発を実施する。</p> <p>開発を検討する主な技術は、以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セメント製造時に原料となる石灰石が脱酸することにより排出されるCO₂の分離・回収システム構築の研究 ・生コンクリートスラッジの炭酸化によるCO₂回収・再利用技術の研究 ・コンクリートCO₂固定化技術の研究 ・廃コンクリートCO₂回収技術を用いた最適な再資源化製品開発の研究 など 	
アウトプット指標		アウトプット目標
研究開発に係る活動の成果物。目的達成に向けた活動の水準。		
(指標 1)	パイロットプラント規模においてセメント工場に最適なCO ₂ 分離・回収システムの構築	(2021年度(終了時評価時)) セメントキルン排ガスに適した経済的で効率的なCO ₂ 吸収液・回収システムの選定
(アウトプットの受け手)	セメント会社、建設会社等	
(指標 2)		(2021年度(終了時評価時))

<p>実験室規模において CO₂ をセメント廃棄物等に固定する技術の確立</p> <p>(アウトプットの受け手) セメント会社、建設会社等</p>	<p>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.以上</p>
<p>(指標 3) 特許出願数および論文等発表数</p> <p>(アウトプットの受け手) セメント会社、建設会社等</p>	<p>(2021 年度(終了時評価時)) 5 件</p>
<p>アウトカム指標</p> <p>研究開発に係る活動自体やそのアウトプットによって、その受け手に、研究開発を実施または推進する主体が意図する範囲でもたらされる効果・効用。</p>	
<p>(指標 1) 本事業の開発技術の導入を目指すセメント工場数</p>	<p>(2030 年度) 3 工場以上</p>
<p>外部有識者（産構審評価 WG 又は NEDO 研究評価委員会）の所見【技術評価】</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ 固定化の量と速度、コストなど本事業の導入効果を今後定量的に示す必要がある。 • CO₂ を加速吸収させるだけではライフサイクル全体で CO₂ 削減とはならない。LCA の観点からの総合評価とすることが望ましい。 • 二酸化炭素排出削減の政策実現へのインセンティブの確保、知財を含む最適な技術の利用促進など、国の関与に関しても検討願いたい。また、成果の実用化に関して業界全体に波及することを期待する。 <p>〔第 5 1 回産業構造審議会評価ワーキンググループ〕</p>	
<p>上記所見を踏まえた対処方針</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 「再資源化による CO₂ 排出削減・CO₂ 固定化研究開発」において、事業者が CO₂ の排出削減量と CO₂ 固定化量・固定化速度およびコスト試算を実施し、技術検討委員会等でそれを定量的に評価することとしたい。 • 本事業における CO₂ 削減効果は、廃コンクリートをセメント原料として再利用することにより、天然石灰石の使用量が削減することによるものである。本事業では、炭素循環型セメント製造プロセスを社会実装した場合のシステム全体の CO₂ 削減効果を総合評価するため、実装モデル工場と対照モデル工場を設定し、それぞれの CO₂ 排出量を比較することとしたい。 • 国の関与については、当該事業の成果も踏まえ、業界と一体となって検討して参りたい。 	

●特許等リスト

【特許】

	種別	番号	名称	出願人	年月
1	特許	特願 2020-175863	廃コンクリートからのセメント原料回収方法	太平洋セメント(株)、 早稲田大学	2020.10
2	特許	特願 2021-024221	廃コンクリートからのセメントペースト回収方法	太平洋セメント(株)、 早稲田大学	2021.2
3	特許	特願 2021-024222	廃コンクリートからのセメントペースト回収方法	太平洋セメント(株)、 早稲田大学	2021.2
4	特許	特願 2021-060238	二酸化炭素の固定化方法	太平洋セメント(株)	2021.3
5	特許	特願 2021-060251	二酸化炭素の固定化方法	太平洋セメント(株)	2021.3
6	特許	特願 2021-160598	クリンカ粉末及びその製造方法	太平洋セメント(株)	2021.9
7	特許	特願 2021-160849	クリンカ粉末及びその製造方法	太平洋セメント(株)	2021.9
8	特許	特願 2022-056202	アミン系吸収液の管理方法	太平洋セメント(株)	2022.3
9	特許	(予定)	二酸化炭素の固定化方法	太平洋セメント(株)	2022.3
10	特許	特願 2022-042341	セメント組成物の製造方法	太平洋セメント(株)	2022.3
11	特許	特願 2022-058987	軽量気泡セメント質硬化体の製造方法	太平洋セメント(株)	2022.3
12	特許	特願 2022-056278	炭酸化軽量気泡セメント質硬化体の形成方法	太平洋セメント(株)	2022.3

【外部発表】、【論文】

	種別	タイトル	学会名・書誌名等	発表者	所属	年月
1	発表	高度粉碎による炭酸化廃コンクリートからの骨材・セメントペーストの相互分離	資源・素材学会 2021 年春季大会	大西真理子*,伊藤輝*,大和田秀二*,瀧澤洸**,一坪幸輝**,吉川知久**,石田泰之**	*)早稲田大学, **)太平洋セメント(株)	2021.3
2	発表 (ポスター)	電気パルス粉碎および攪拌型粉碎による炭酸化廃コンクリートの粉碎挙動解明の検討	資源・素材学会 関東支部 第 18 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会	伊藤輝*,大西真理子*,大和田秀二*,瀧澤洸**,一坪幸輝**,吉川知久**,石田泰之**	*)早稲田大学, **)太平洋セメント(株)	2021.8
3	記事	炭素循環型セメント製造プロセス技術開発 (セメント工場を中心としたカーボンリサイクル社会の実現に向けた取り組み)	コンクリート工学 Vol. 63、No. 9	一坪幸輝*、平尾宙*、野村幸治*、上野直樹*	*)太平洋セメント(株)	2021.9
4	発表	低炭素型セメントを用いた炭酸化養生コンクリートの硬化性状とCO2 低減効果	第 143 回無機マテリアル学会 学術講演会	小林和揮*,馬場智矢*,橋本真幸*,細川佳史*,一坪幸輝*	*)太平洋セメント(株)	2021.11
5	記事 (記事の一部として記載)	2050 年カーボンニュートラルに向けた取り組み / 太平洋セメント	セメント・コンクリート No.900	星野清一*、平尾宙*、林康太郎*、野村幸治*、上野直樹*	*)太平洋セメント(株)	2022.2
6	記事	Carbonation-cured concrete	International Cement Review March 2022	小林和揮*,馬場智矢*,橋本真幸*,細川佳史*,一坪幸輝*	*)太平洋セメント(株)	2022.3
7	記事 (記事の一部として記載)	2050 年カーボンニュートラルに向けた太平洋セメントの取り組み	エネルギー・資源 Vol. 43, No.3 (2022 年 3 月号)	星野清一*、平尾宙*、林康太郎*、野村幸治*、上野直樹*	*)太平洋セメント(株)	2022.3

【プレスリリース】

	発表機関	名称	年月
1	太平洋セメント(株)	NEDO 課題設定型助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」に採択 ―温室効果ガス排出削減に向けた革新的技術の実用化への取り組み―	2020.6
2	太平洋セメント(株)	(関連リリース) カーボンニュートラルの実現に向けて「カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム」を新設	2021.3
3	太平洋セメント(株)	セメントキルン排ガスからの CO ₂ 分離・回収実証試験のための設備設置について	2021.4
4	太平洋セメント(株)	NEDO 助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」 セメントキルン排ガスからの CO ₂ 分離・回収、有効利用実証試験設備完成 ―カーボンニュートラル実現に向けた革新的技術の開発を加速―	2022.2