

UBE三菱セメントの カーボンニュートラルに向けた取り組み

セメント産業におけるCO₂排出量の削減は社会的に極めて重要な課題である。当社においても2030年までのCO₂排出量40%削減（2013年度比）および2050年のカーボンニュートラル(CN)達成を目指し、CN推進委員会、CN技術推進室、研究所連携のもと、CO₂を減らす、集める、使う、溜める技術の開発および事業構想の検討に取り組んでいる。

開発した技術はクリンカ比率低減（混合材利用）、キルン熱エネルギーの低炭素エネルギーへの転換、セメントキルン排ガス中のCO₂分離回収、メタネーション技術、Ca含有廃棄物の炭酸塩化など多岐に渡り、一部の技術は実証・スケールアップ段階へ移行を進めている。

本稿では、当社がカーボンニュートラル実現に向けて取り組んできた技術開発の事例をまとめ、現中期経営戦略の3年間を通じて実施した各種施策の概要を紹介する。

1 緒言

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CO₂を排出しており、その排出削減対策は重要な課題となっている。

当社は、2023年4月5日に中期経営戦略「Infinity with Will 2025～MUCC サステイナブルプラン 1st STEP」の中で、地球温暖化対策を重要課題として取り上げた。この中では、大型港湾を有する西日本臨海部に主力拠点が集中し、これまで複合素材メーカーの中でセメント事業を継続することで蓄積してきた技術・サプライチェーンを有する強みを活かして、セメントメーカー独自の事業性のある脱炭素スキームを実現させ、2030年にCO₂排出量を2013年比で40%削減、2050年にカーボンニュートラル達成を目指すこととしている。主な施策は以下である。

I. エネルギー転換の早期実現

(1) 焼成用熱エネルギー転換

- ・廃棄物代替：50%（～2030年）
- ・カーボンフリーエネルギー：50%（～2050年）

II. CCUの早期事業化

- (1) セメント製造プロセスから発生する原料由来のCO₂を低コスト・高濃度で回収
- (2) 回収したCO₂を有用な資源として活用するビジネスモデルを確立（～2030年）

このために技術ロードマップを作成し、上記目標達成に向けた研究開発の実行およびその実証・実装に取り組んでいる。

以下にその状況について報告する。

2 MUCCのカーボンニュートラル推進体制

地球温暖化対策を強力に推進するため、23年8月1日付で当社は組織改定を行った。

地球環境対策プロジェクト内に、企画機能を強化するため「企画室」を、カーボンニュートラル技術のプロセス開発・実証・実装を推進する「カーボンニュートラル技術推進室」を新設した。

さらにカーボンニュートラルに係る基本方針・戦略の提言および関連施策等の審議・進捗管理等を行うステアリングコミッティー※として社長・専務を委員長・副委員長とする本委員会を設置した（2023年10月1日）。

※ステアリングコミッティー：プロジェクト全体の利害調整や進捗管理を行う運営委員会

3 カーボンニュートラル実現に向けた技術開発

当社は、カーボンニュートラルに向けてCO₂を減らす、集める、使う、溜めるための技術開発等に取り組んでいる（図1）。

次項より、それぞれにおける技術開発の状況について説明する。

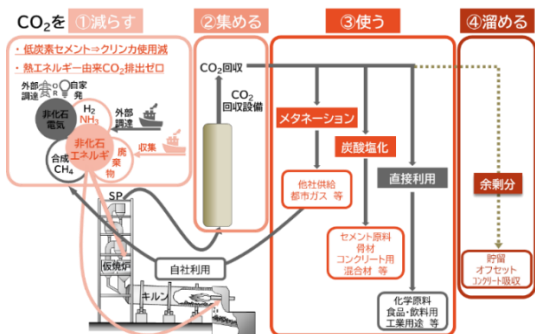


図1 MUCCのカーボンニュートラルに向けた技術開発の方向性

(1) CO₂を減らす技術開発

① セメント・コンクリートの低炭素化

・普通セメントの少量混合成分増量

セメント業界では、2050年カーボンニュートラル実現に向けた長期ビジョンを策定し、脱炭素社会への貢献を目指している。方策の一つとしてクリンカ/セメント比の低減を挙げている。具体的には、普通ポルトランドセメント（N）の少量混合成分として、石灰石や高炉スラグ、フライアッシュなどの混合材の上限値を現状の5%から10%に引き上げることを検討している。

その実現に向け、当社を含むセメント協会会員会社では、少量混合成分を10%混合した普通ポルトランドセメント（10%化N）を試製（図2）し、それらのセメントの品質やコンクリートの諸特性に及ぼす影響を検証している。密度の低下や強熱減量の増加といった特徴が確認されたが、モルタル物性や主要なコンクリートの物性・耐久性は現行品と同等であることが示された（図3）。

当社では、2000年代からクリンカの鉱物組成（C₃A, C₄AF）や少量混合成分がNの性能に及ぼす影響^{(1),(2)}を研究し、最適な材料設計に取り組んできた。近年では、少量混合成分の増加に応じて比表面積を調整した10%化Nを工場の実機で製造し、モルタルやコンクリートの物性に問題がないことを実証している^{(3),(4)}。今後の規格改正を見据えて、10%化Nの早期実用化に向けてさらなる取り組みを進めていく。



図2 試製した10%化Nの構成

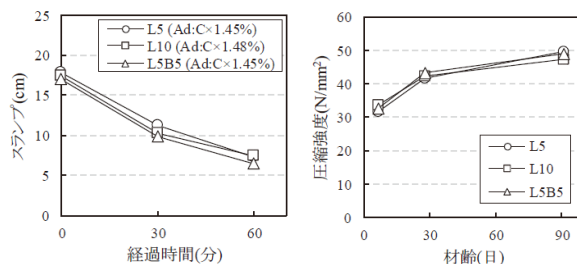


図3 現行N(L5)および10%化N(L10, L5B5)のスランプ(右)および圧縮強度(左)

・環境配慮型コンクリートの開発

また、セメント・コンクリートの低炭素化の一つの手段として、混合セメントの利用がある。現状、高炉セメントB種は既に広く普及している一方で、近年では、更なるCO₂削減を目的に、高炉スラグを高炉セメントC種（JIS R 5211、高炉スラグの分量：60%超70%以下）もしくはそれ以上に含有したコンクリートの実用例も増加している。

当社は、従来の混合セメントを用いた場合よりも低炭素性に優れる、結合材中の高炉スラグの含有量を約80%まで増やした環境配慮型コンクリートの開発を進めてきた。

当社技術の特長として、結合材のベースとなるポルトランドセメントの組成の最適化および強度増進と収縮低減に寄与する特殊混和材の添加により、高炉スラグ含有量が多い場合でも、強度を確保しつつ、自己収縮ひずみが小さく、温度ひび割れ抵抗性にも優れるコンクリートの製造が可能である（図4）。

本結合材を用いたコンクリートは、一般的なコンクリートと同様にフレッシュ性状や圧縮強度の制御が可能であり、構造体強度の発現も良好であることを確認している。今後も、実用化に向けた取り組みを進めていく。

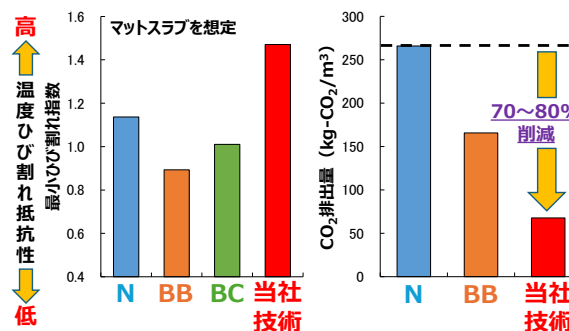


図4 温度ひび割れ抵抗性とCO₂削減率

・新たな低炭素結合材の探索（粘土系鉱物）

その他、クリンカ比率の低減に関する技術の一環として、従来の高炉スラグやフライアッシュ以外の混合材の探索を目的とした研究⁽⁵⁾も進めている。当社では新たな混合材として、近年利用が進められているカオリナイトと似た構造を有するアロフェンやハロイサイトに着目した。アロフェン等は、火山噴出物が風化する過程で生成されるため日本国内でも入手できる可能性があり、一定温度以上での加熱によるセメントとの反応性向上や、石灰石との組み合わせによる圧縮強度の向上(図5)が確認されている。今後は、このアロフェン等の実用化に向け、材料のポゾラン反応評価や、耐久性に関する詳細な評価に取り組む予定である。

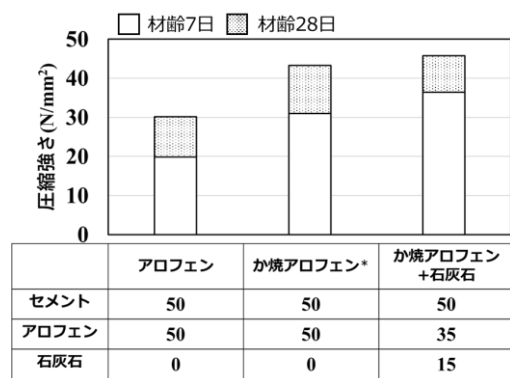


図5 圧縮強さ試験結果

② エネルギー転換

・熱エネ代替率向上

当社は、廃プラスチックを始めとする熱エネルギー代替廃棄物の利用拡大を進めてきた。2030年度までには、熱エネルギー代替率50%を目標に今後も拡大を図るとともに自家発電所でも積極的なバイオマスの増量を計画している（図6）。これを実現するために、九州工場を中心とした廃プラ処理能力増強等を図るとともに、廃プラ等の広域収集にも取り組んでいく。

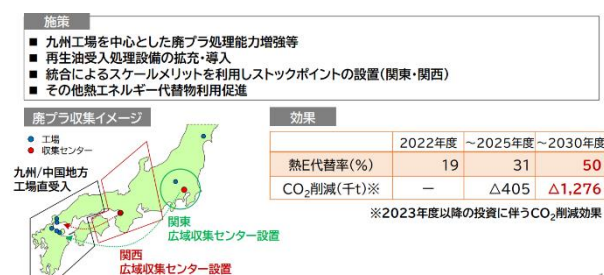


図6 MUCCの熱エネ代替率50%に向けた施策概要

・カーボンフリーエネルギーの利用

アンモニアは燃焼時にCO₂を排出しない次世代エネルギー源として世界的に注目されている。当社では会社統合前の2014年から2018年に宇部興産株式会社として国家プロジェクトに参画し「アンモニア混焼セメントキルンの技術開発」に取り組んできた。2023年には山口県が公募したカーボンニュートラルコンビナート構築促進補助金において「セメント製造プロセスにおけるアンモニア燃焼技術実証事業」をUBE（株）と共同提案し採択された。本事業では、山口工場宇部地区の実機設備であるセメントキルン（焼成炉）および仮焼炉を用いてアンモニアを使用する実証燃焼試験を進めている。これまでにセメントキルンにて石炭の熱量比30%をアンモニアで代替する目途を得ており、仮焼炉については、同じく30%代替を目指して2025年度内に試験を完了させる予定である。

③ 新たなバイオマス系エネルギーの開発

・下水汚泥の発酵乾燥技術

当社はバイオマス利用に関して、保有水分が多く熱エネルギー源としての活用や処理拡大が困難であった下水汚泥の有効利用技術として、微生物の力により下水汚泥を効率よく乾燥させる「下水汚泥発酵乾燥」の実用化に着手した（図7）。同技術は、従来の下水汚泥コンポスト化施設で採用されている堆肥舎方式の代わりに、畜糞堆肥化分野で多くの実績があり、熱効率が高く臭気対策が容易な縦型密閉発酵槽を使用する。当社は、この縦型密閉発酵槽に下水汚泥用に開発した副原料と発酵制御技術を組み合わせた高速安定発酵技術を開発した。生成する発酵乾燥汚泥は、土壌改良効果を有し肥料としての利用が期待できるほか、セメント工場他で熱エネルギー源としての利用もできる。また、下水汚泥の乾燥熱源が不要となり省エネルギーかつ設置制約が少ない乾燥技術であるため、処理困難な下水汚泥の使用促進や循環型社会への更なる貢献も果たせる。なお、同技術は、令和5年度国土交通省下水道革新的技術実証事業プロジェクトに「縦型密閉発酵槽による下水汚泥の肥料化技術に関する実証事業」として採択された。現在、宍道湖西部浄化センター（島根県）に試験設備を設置し、肥料生産の実証事業を進めている。

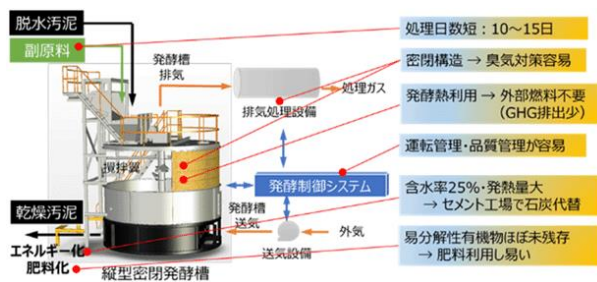


図7 下水汚泥発酵乾燥技術の概要

・バイオマス系炭化技術

当社の開発したMUCCトレファイドペレット®（図8）は、一般的なバイオマス燃料である木質ペレットに独自の炭化処理を施すことで、耐水性と粉碎性の向上に加え、屋外保管を可能とし、石炭火力発電所における石炭粉碎設備の大幅な改造なしで利用することを可能としたバイオマス固体燃料である。2019年12月に稼働した当社宇部地区にある製造設備では年間6万トンのMUCCトレファイドペレット®を製造しており、貯炭場に屋外保管した後に当社が保有する火力発電設備において石炭と混焼している。



図8 MUCCトレファイドペレット®の外観

当社と神戸製鋼所は、MUCCトレファイドペレット®を発電利用のみならず、製鉄原料としての使用を視野に詳細な事業化検討を共同で進めている。まずは当社でのMUCCトレファイドペレット®の使用量拡大を図るとともに、神戸製鋼所向けにMUCCトレファイドペレット®を製造販売する合弁会社の設立を目指す。

・木質系バイオマスの油化技術

当社は、上記のバイオマス系炭化技術だけでなく、重油等の石油資源代替として、木質バイオマスを熱分解して液体燃料化（熱分解油化）する技術にも着目している。熱分解油化は、固形燃料化

（炭化）や気体燃料化に比べ検討例は少ないものの、近年、国内外で急速加熱プロセスによる熱分解油化の試みが進められている。急速加熱プロセスは、油化に特化した高度なプロセスであり、セメント工場で受け入れている建設廃木材のように不純物を多く含む木質バイオマスへの適用は難しい。一方で、油化に特化せずとも、セメント工場では熱分解残渣の炭化物を熱エネルギー源として利用可能であるという利点がある（図9）。セメント工場における合理的で安価なプロセスを目指し、実用的な熱分解条件や設備の検証を進めている。

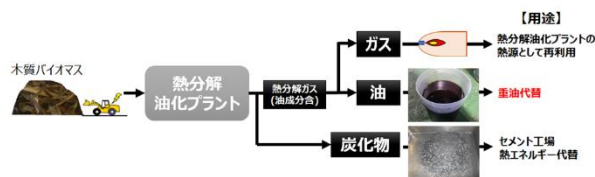


図9 セメント工場における熱分解油化の概略図

(2) CO₂を集める・使う技術開発

① セメントキルン排ガスからのCO₂回収

セメント工場では熱エネルギー由来のCO₂削減に取り組んでいるが、原料の石灰石に由来するCO₂排出は、製造プロセス上避けられない。そこで、当社では排ガス中のCO₂分離回収技術として、省エネルギー性や省スペース性が期待されるアミン系固体吸収材（川崎重工業製）を用いた手法の検討を進めている。

本手法によるCO₂分離回収の実証設備は、九州工場黒崎地区に設置（図10）しており、実機キルンの排ガスをを用いて回収性能や吸収材の耐久性確認を行っている。実証試験では、セメント工場排ガスに特有の現象を含め、CO₂分離回収プロセスへの影響を検証しているが、現時点では明確な差異は確認されていない。一方で、いくつかの技術課題も明らかとなっており、今後はその課題解決に取り組むことで実装に備える。

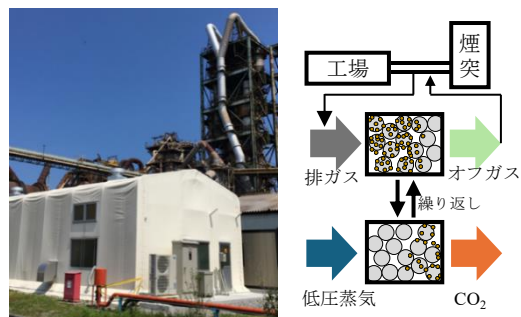


図10 九州工場黒崎地区での実証試験設備

② 炭酸塩化技術

・ NEDO/GI基金の取り組み

当社は、NEDO／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プロジェクト」に参画している。このプロジェクトでは、廃コンクリートや焼却灰などカルシウムを多く含有する多様な廃棄物から抽出した酸化カルシウム（CaO）を、セメント生産工程で回収されたCO₂と結合させることで炭酸カルシウム（CaCO₃）を生成（炭酸塩化）し、建築・土木材料、各種工業材料等の資源として活用するための技術開発（図11）を進めており、当社は廃コンクリートからの効率的なCaO分離と直接方式のCO₂吸収技術の開発を担当している。これまでに、すりもみ法、加熱すりもみ法、ブラスト法などの各種再生骨材製造方法により発生する微粉を対象に、回収率やCaO含有量などに及ぼす運転条件の影響を把握してきた。また、抽出した微粉の炭酸化における最適な条件をラボレベルで検討し、現在はセメント工場排ガスを使用した実証試験にも着手している。炭酸化した微粉は、CaCO₃純度が低いものの、CO₂を安価に固定できる材料として、コンクリート用途への適用性の検討を進めている。

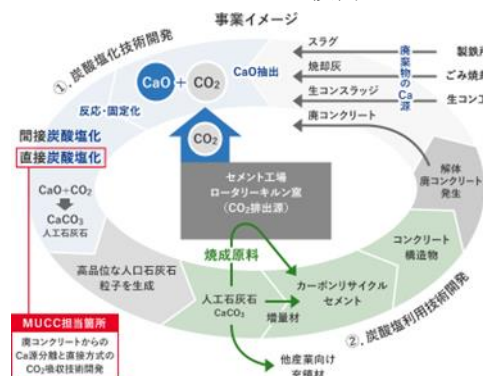


図11 多様なCa源を用いた炭酸塩化技術の確立の全体像

・ 炭酸塩人工砂「GX-eビーズ®」の開発

建設分野では、近年カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みとして、コンクリートへのCO₂の固定、すなわちCCUS技術（CO₂の分離回収・利用・貯留）の開発が盛んとなっている⁽⁶⁾。しかし、いずれも粉体材料としての利用のため、使用量の制約と併せて普通コンクリートのような汎用コンクリートへの適用は難しい。このような背景から、当社では、汎用コンクリートにも適用できるCCUS技術の確立を目指し、コンクリート構成

材料の大部分を占めている骨材（特に細骨材）に着目し、CO₂を固定化した人工砂の開発に取り組んだ。この開発した促進炭酸化技術により、排ガス中に含まれるCO₂の固定化に貢献できると共に、さらに低炭素型の結合材を用いて造粒することで、カーボンネガティブな人工砂（GX-eビーズ（図12））の開発に国内で初めて実現した。併せてコンクリート・二次製品への適用性についても確認した。今後は、製造設備をさらにスケールアップし、安定品質を確保したうえで量産条件を検討する予定である。

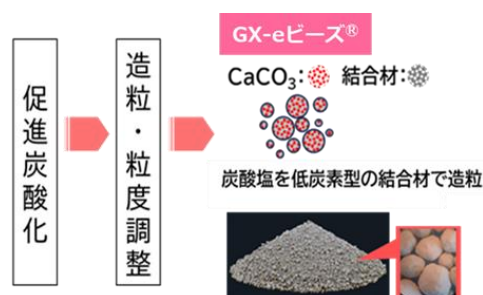


図12 開発したカーボンネガティブな炭酸塩人工砂「GX-eビーズ」

・ 廃コン再生骨材の炭酸化

現在、建設現場などから年間約4,000万tものコンクリート塊が副産物として発生しており、これらの多くは、路盤材として再利用されている。しかし近年、路盤材の需要は減少傾向にあり、特に都市部では、発生するコンクリート塊の量が路盤材としての需要を上回ると予測されている。そのため、今後はこれらのコンクリート塊の処理が困難になることが懸念されており、新たな再利用方法の確立が求められている。このような背景のもと、コンクリート塊を破碎して製造される再生骨材の需要拡大が望まれている。また、再生骨材にはセメント水和物が付着しており、これを炭酸化させることで再生骨材の品質を向上させることが可能である。

当社では、再生粗骨材の促進炭酸化技術とその改質効果について検討を進めている。具体的には、再生粗骨材をセメント工場の排気ガスを想定した高濃度の二酸化炭素環境下で炭酸化を行うことで、高い炭酸化率が得られ、それに伴い密度の増加、吸水率が低下することを確認している（図13）。こうした改質効果は、再生骨材に含まれるモルタルの原骨材への付着状態や、モルタルのみで構成さ

れる粒子の割合の影響を受けることが明らかになっている。さらに、炭酸化再生粗骨材を用いたコンクリートは、炭酸化していない再生粗骨材を使用した場合と比較して乾燥収縮が抑えられる傾向があることが分かっている。これは、炭酸化によって骨材自体の乾燥収縮が低減されることが一因であることを実験により推察している。今後は、炭酸化による再生粗骨材の改質効果とコンクリートの品質に与える影響の関係を明らかにし、再生骨材を二酸化炭素の固定資材として活用する有効性について検証を進めていく。

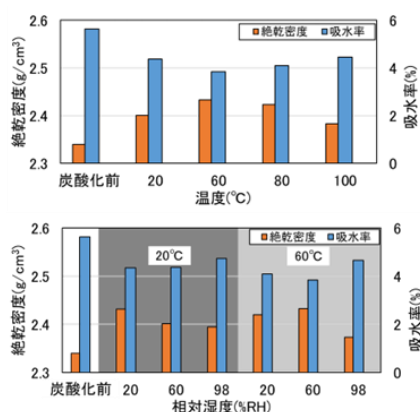


図13 炭酸化による改質効果（温湿度条件の影響）

・MCi Carbon社/伊藤忠商事との取組

MCi Carbon社は蛇紋岩や鉄鋼スラグ等にCO₂を固定させ、炭酸塩（炭酸カルシウム、炭酸マグネシウム等）を製造する技術（図14）を有する豪州のスタートアップ企業であり、パイロットプラントでの実証を経て、現在、世界初の炭酸塩鉱物化デモンストレーションプラント“Mytle”を建設中である（図15）。

当社は、MCi Carbon社と出資および協業に関する契約を締結し、廃コンクリート、スラグ等とセメント工場から排出されるCO₂から、高品質な炭酸塩を高効率、低コストで製造する実証規模の炭酸塩化技術の確立を目指している。また、このような廃コンクリート等の廃棄物処理、CO₂利活用に加え、同炭酸塩をセメント混合材や新しい建設資材、さらには他分野の新規高機能製品として利用する製品開発を進め、日本国内での事業化を検討する。そのため伊藤忠商事を含めた三社で覚書を締結し、事業モデルの構築及びマーケティング等の検討を推し進め、カーボンニュートラル事業の実現を目指している。

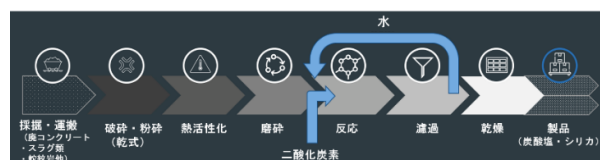


図14 MCi Carbon社の炭酸塩化プロセス
(MCi Carbon社資料を基に当社作成)



図15 Mytle全景

③ メタネーション

排ガスから分離回収したCO₂を水素と反応させてメタンを生成（メタネーション）することで、排出されるCO₂を再利用可能な熱エネルギーへと転換できる。本技術は、再生可能エネルギー技術との組み合わせにより、カーボンリサイクルの実現が期待されている（図16）。

当社では、セメント工場排ガスから回収したCO₂を用いたメタネーションの実証試験を実施している。九州工場黒崎地区に設置した実証設備において、実機キルン排ガスを用いたCO₂分離回収性能および触媒耐久性を確認している。サバティエ反応によるNi系触媒を用いたメタン化では、液化炭酸ガスとの比較でも初期性能に大きな差は見られなかった。

一方、長時間連続運転では、回収CO₂ガス使用時の触媒温度分布の変化とともにメタン化効率の低下が確認され、回収CO₂ガスに含まれる微量成分の影響が示唆された。現在、前処理フィルターの開発を進めており、触媒劣化の抑制と長期安定運転に向けた技術検討を継続している。

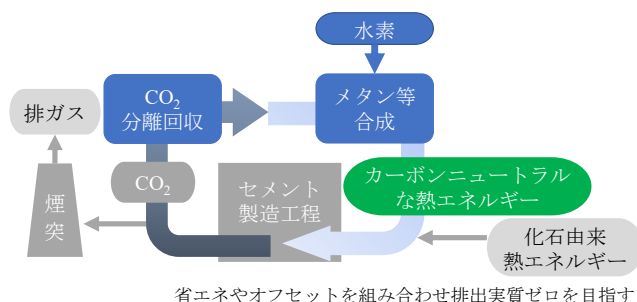


図 16 工場排ガスのリサイクル概念図

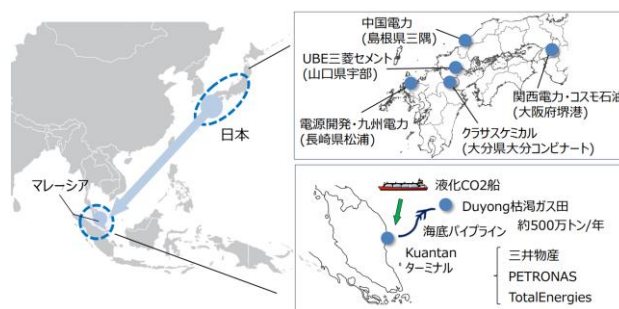


図18 マレー半島沖南部CCS事業概要⁽⁷⁾

(3) CO₂を溜める取り組み

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) とは、二酸化炭素回収・貯留技術と呼ばれ、セメント工場や発電所などから排出されたCO₂を、ほかの気体から分離して集め、地中深くの帯水層や枯渇油ガス田に圧入・貯留するものである。

当社は三井物産他各社と共同で、九州・中国・近畿地方等の複数産業（セメント・化学・石油精製および発電）から排出されるCO₂の分離・回収から液化・貯蔵、マレーシアへの液化CO₂の海上輸送、ならびに三井物産などが開発を進めるマレーシア・マレー半島沖南部でのCO₂地下貯留までの一連のバリューチェーン構築について、調査・検討を行っている。また、当社は、山口工場宇部地区で排出されるCO₂の分離・回収、液化・貯蔵、輸送事業者への引き渡しを担い、必要な技術的要件の検証およびコストの概算などの検討を進めている（図17）。なお、本事業はJOGMEC（独立行政法人 エネルギー資源・金属鉱物資源機構）の先進的CCS事業（マレーシア・マレー半島南部CCS（図18））の一環として実施しており、2025年度のFEED前検討完了（国の制度が確定した段階でFEEDが可能な状態）を目指している。

4 紹介技術の普及・実用化に向けた課題

以上のように、当社はこれまでのCO₂削減の取り組みをより一層加速させつつ、更なるCO₂削減や利活用に関わる新技術の開発・実装にも取り組み、2050年のカーボンニュートラル達成に向けて進んでいる。カーボンニュートラル化技術の実装には、これまでのセメント製造で蓄積してきた技術に加えて、新たな技術・プロセス導入を推し進める必要がある。

当然このような動きは当社単独で進められるものではなく、CO₂を固定化するための大量のCa源やメタン化に必要な安価なH₂源などの原料調達のほか、CO₂を利用した商品（CO₂ガス、炭酸塩、メタンなど）を多く利用しつつサプライチェーン全体で利益が得られるための仕組み・体制作りをユーザー丸となって取り組む必要がある。

また、CO₂を建設資材として利用拡大していくには、上記で述べたような技術開発に加えて、CO₂を削減・利用したコンクリート等の設計・施工方法の開発や、利用を促進するための規格化、基準・ガイドラインの制定など、発注者や施工者などとの協業も不可欠となる。新たな材料のコンクリート利用には、耐久性を含めた性能実証も必要あり、今後もこれらの協業に取り組んでいく。

一方で、これまでクリンカの製造で担ってきた廃棄物・副産物の有効利用に関しても、これまで通り循環型社会構築への貢献を意識しながら、セメント品質・性能の維持・向上と共に、CO₂排出量の削減と廃棄物・副産物利用を両立することを進める必要がある。

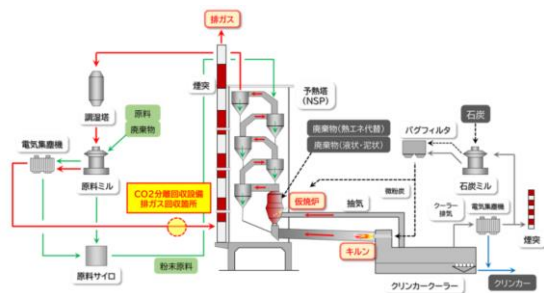


図17 山口工場宇部地区でのCO₂回収

5 結 言

本稿では、MUCCの地球温暖化対策に関する中期経営戦略と、セメント製造のカーボンニュートラル化に向けての技術開発動向を述べた。セメント産業全体に言えることだが、2030年までに実用化・実装可能な技術は可能な限り前倒しで実行してCO₂削減を図るとともに、CO₂削減や利用に関わる様々な新技術を確立・実証し、それらを組合せて段階的に実行することで2050年のカーボンニュートラル化を目指していくことになる。

今後も地球温暖化対策に資する技術開発とその実証・実装を加速させ、中期経営戦略で設定した2030年のCO₂削減目標の達成と、2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、MUCCグループ丸となって取り組んでいく所存である。

(参考文献)

- (1) 吉田友香他／クリンカー中のC₃A量が石灰石を10%添加したセメントの強さに及ぼす影響，第76回セメント技術大会講演要旨，pp.204～205，2022
- (2) 門田浩史他／少量混合成分を10%まで増加させたセメントの圧縮強さに及ぼすベースセメントのC₃Sの影響，第74回セメント技術大会講演要旨，pp.186～187，2020
- (3) 丸屋英二他／廃棄物使用量の増大とCO₂排出量削減に向けたセメントの材料設計，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.20(1)，pp.1～11，2009
- (4) 三隅英俊他／C₃A量と混合材を共に増量した高間隙相型混合セメントの水和発熱特性，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.133～139，2014
- (5) 福島悠太他／アロフェン及びハロイサイトを含む煅焼粘土のセメント混和材への適用検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.77，pp.550-557 (2023)
- (6) 佐々木猛他／エコタンカル®（軽質炭酸カルシウム）とその可能性，セメント・コンクリート，No.900，pp.58-62 (2022)
- (7) <https://www.jogmec.go.jp/content/300395116.pdf>