火力発電所由来 CO2 の利用に関する技術動向と土木分野における課題

2024 年 2 月

土木学会エネルギー委員会　新技術・エネルギー小委員会

火力発電所由来 CO2 の利用に関する土木技術の調査・研究分科会

目 次

第１章　はじめに 1

第２章　2050 年カーボンニュートラルに向けた CR 動向 2
2.1　気候変動問題 2
2.2　気候変動枠組条約に係る動向 4
2.3　国内における CR 関連政策 5
2.3.1 日本の気候変動対策 5
2.3.2 地球温暖化対策としての CR 関連政策 8
2.3.3 日本の CR 推進事業 10
2.3.4 CR 分野の国際連携 17
2.3.5 今後の政策的課題 20
2.4　海外における CR 関連政策及び国際的枠組みの動向 26

第３章　CR に係る土木技術等 31
3.1　CR 技術領域 31
3.1.1　CR 技術の分類 31
3.1.2　土木技術の位置づけ 32
3.2　コンクリート・セメント分野の技術 34
3.2.1　国内・海外の技術紹介 34
3.2.2　CO_2 吸収・利用に係る技術 39
3.2.3　CO_2 低減に係る技術 47
3.2.4　CO_2 吸収・利用及び低減技術のまとめ 53
3.3　CO_2 低減に関連する土木技術 56
3.3.1　フライアッシュ有効利用 56
3.3.2　CCS 66
3.3.3　ブルーカーボン 80
3.4　CR に係る関連技術等 92
3.4.1　CO_2 直接回収技術（DAC） 92
3.4.2　CR におけるエネルギー供給 110

第４章　CR 技術の社会実装に向けて 116
4.1　技術開発の促進 117
4.1.1　CR 技術の概略と主要な技術開発事項 117
4.1.2　各国の技術開発への資金支援事例 119
4.2　ビジネスモデルの構築 123
4.3　CR 事業の立地、輸送インフラの整備 126
4.4　法制度及びインセンティブ設計 128
4.4.1　標準化・LCA 評価 128
4.4.2　インセンティブ施策 128

第５章　おわりに 133

謝辞 135

巻末資料　コンクリート・セメント分野の CO_2 対策技術紹介 136

第１章　はじめに

土木学会エネルギー委員会の新技術・エネルギー小委員会では、2020 年度の準備委員会の承認を得て、2021 年度に「火力発電所由来 CO2 の利用に関する土木技術の調査・研究分科会」（略称：カーボンリサイクル（以下、CR）分科会）を立ち上げた。CR 分科会の活動の目的として、

１）CR の普及・促進に貢献できる土木技術の調査

２）将来的な社会システム、ビジネスモデル、バリューチェーンの検討

３）技術的課題および制度・法令面などの課題抽出・整理

の３つを掲げて、2021 年度から文献調査、学識経験者へのヒアリングや研究会、関連施設の見学等を実施しながら、2023 年度まで活動を継続してきた。

その中で、2022 年度から電力業界での CR 普及や促進に資する報告書の取り纏めと成果の情報発信を目指して、“火力発電所由来 CO2 の利用に関する技術動向と土木分野における課題”と題する報告書の作成を進めてきた。

報告書の作成に当たっては、CR 分科会メンバー（第５章「おわりに」を参照）が３班（下表を参照、下線は各班の班長）に分れて分担して取り纏めた。

A 班	B 班	C 班
政策、動向全般、 社会実装への動き	コンクリート・セメント、 CO_2 削減効果	フライアッシュ、CCS、 ブルーカーボン、DAC 他
坂西主査／産総研 参納委員／北陸電力 澁谷委員／JERA 下田委員／電中研 髙木委員／東北電力	大西委員／西松建設 大山委員／鹿島建設 北垣委員／北海道大学 髙木委員／清水建設 坪田委員／中国電力	松本幹事／JPOWER 石川委員／/沖縄電力 加藤委員／中部電力 松本委員／安藤ハザマ

この報告書は、2023 年度上期にドラフト版を取り纏め、2023 年度下期に完成した。今後は、報告書の成果を基に、成果報告会やワークショップを開催して情報発信することを検討している。

この報告書が、土木学会エネルギー委員会の新技術・エネルギー小委員会を通じて、火力発電所由来 CO_2 の削減に寄与する土木関連技術の研究開発の方向性を示し、2050 年カーボンニュートラル社会の実現に貢献できれば望外の喜びである。

第２章　2050 年カーボンニュートラルに向けた CR 動向

第２章では、第 6 次エネルギー基本計画で掲げられた 2030 年の温室効果ガス（GHGs）削減：－46%（更に－50%の高みを目指す）の達成に向けた技術動向を概説し、特にカーボンリサイクル技術動向に着目して、2050 年カーボンニュートラルの達成に向けたより革新的な技術と共に、目標実現のための課題解決の方策について述べる。

2.1　気候変動問題

2015 年の COP21 で合意されたパリ協定（採択は 2016 年）では、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」という目的を掲げ、先進国・途上国関係なく、すべての国で共通する目標であり、地球温暖化対策における基本方針であった。

1992 年に採択された国連気候変動枠組条約以降、世界的に温室効果ガスの排出量を削減するべきだという議論がなされた。今のままだと 21 世紀末には平均気温が 4 度上昇し、水不足や農作物の減少、干ばつや森林火災、海面の上昇など深刻な影響が出ると予測されている。京都議定書以降、何度も COP は開かれたが、各国の同意が得られず国際的な目標は採択されなかった。

そしてようやく 2015 年に採択されたのがパリ協定である。1992 年に国連気候変動枠組条約（UNFCCC）が採択され、「大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させること」を究極の目的とし、世界中で地球温暖化対策を取り組むことに合意した。現在は 197 の国と地域が締結・参加し、温室効果ガス削減の計画や実施、排出量の実績公表などを行っている。

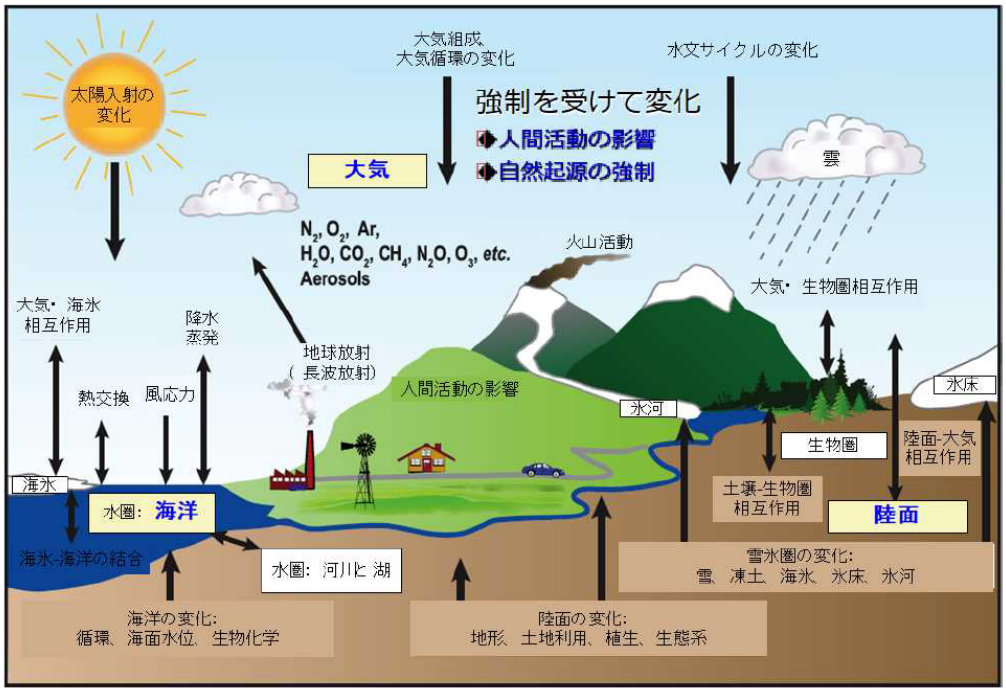
京都議定書は、2008 年～2012 年の間に先進国（アメリカは合意していないため除く）の温室効果ガス排出量に関して、法的拘束力のある数値目標を各国ごとに設定し、国際的に温室効果ガス排出量の削減をしようというものであった。この内容を引き継いだのがパリ協定であるが、その大きな違いは、京都議定書は先進国のみが対象だったが、パリ協定は先進国・途上国を含むすべての国が削減目標の対象となっていることである。今までは先進国と途上国で意見が分かれ、堂々巡りの議論がされてきた。途上国側の意見としては「先進国が排出してきた温室効果ガスをまず削減するべきだ」という内容で、すべての国で共通の目標を掲げるには厳しい状況であった。しかし、京都議定書が採択された後に経済成長を迎えた中国やインドなどの「新興国」が現れたことによって先進国と途上国の議論に変化が生まれ、アメリカ・中国が主導となりすべての国で共通の目標を掲げるパリ協定が合意に至った。

パリ協定の目的は「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」ことで、そのために「できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21 世紀後半には温室効果ガス排出量と吸収量のバランスをとること」を目標としている。削減目標は各国に任されており、自国でどの程度削減するかを設定し、この目標は 5 年ごとに更新され、前回目標を深堀した内容を提出する必要がある。

そして、削減状況は世界共通の評価基準によって第三者が平等で公正な評価を行い、また5 年ごとに国際的に実施状況を確認し、各国が取り組みを強化できるように情報交換を行う仕組みになっている。しかし、京都議定書と違う点は成果が出ていなかったとしても罰則を与えないところで、罰則がないからこそ、5 年ごとに削減目標をレビューし、洗練された目標を掲げるような仕組みになっている。京都議定書でも行われていた緑の気候基金（先進国から途上国へ送られる基金）と呼ばれる資金支援は継続して行い、パリ協定からは支援能力のある国（主に新興国）からも自主的な資金支援することになっている。クレジット制度とは排出削減量を取引するシステムで、パリ協定で行えるクレジット制度はベースライン＆クレジット方式と二国間クレジット制度である。ベースライン＆クレジット方式は温室効果ガスの削減事業を行った際、事業がなかった場合に比べた排出削減量をクレジットとして取引できる方式になっている。二国間クレジットは優れた低炭素技術や製品、システムやサービスを途上国に提供することで、途上国の温室効果ガスの削減や持続可能な開発に貢献し、その成果を二国間で分けあう制度である。

図 2.1-1 に、気候システムを構成する要素とその中の様々な過程や要素間の相互作用及び気候変動の要因を図示している。このようなマクロな要因解析と共に、個別地域での気候変動への影響因子を明確にしていく必要性が示されている。

気候とは、十分に長い時間について平均した大気の状態のことで、例えば気温や降水量などの要素の、30年間の平均値や変動幅などの統計値で表される。



気候システムを構成する要素とその中の様々な過程や要素間の相互作用、及び気候を変化させる要因（IPCC AR4/WG1報告書より、気象庁和訳・加筆）

図 2.1-1　気候システムを構成する要素とその中の様々な過程や要素間の相互作用、及び気候を変化させる要因[1)]（出典：環境省，2022）

2.2　気候変動枠組条約に係る動向

気候変動枠組に係る動向では、最新のエジプトで開催されたCOP27でも議論されたが、結局のところ発展途上国と日米欧等の主要先進国間で主張がかみ合わず、やっと気候変動による「損失と被害」が正式な課題として議論され、地球温暖化に伴う海面上昇や干ばつ等の対策をとっても防止できない影響への金銭的支援基金の設立が合意された。しかしながら、具体的な金銭的支援の方向性や基金の運用等についての議論は COP28 に持ち越された。

図 2.2-1 には、地球温暖化に伴う代表的濃度経路（RCP）シナリオに基づいた５種類の共有社会経済経路（SSP1～5）が示され、2100 年時点でのおおよその放射強制力（W/m²）を組み合わせたシナリオが提案されている。

将来予測シナリオ

- AR5では、代表的濃度経路（RCP）シナリオが使用された。
- AR6では、５種類の共有社会経済経路（SSP1～5）と2100年時点のおおよその放射強制力（W/m²）を組み合わせたシナリオが使用されている。

シナリオ	シナリオの概要	近いRCPシナリオ
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする21世紀末までの昇温（中央値）を概ね（わずかに超えることはあるものの）約1.5℃以下に抑える気候政策を導入。21世紀半ばに CO_2排出正味ゼロの見込み。	該当なし
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする昇温（中央値）を2℃未満に抑える気候政策を導入。21世紀後半に CO_2排出正味ゼロの見込み。	RCP2.6
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入。2030年までの各国の「自国決定貢献（NDC）」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。工業化前を基準とする21世紀末までの昇温は約2.7℃（最良推定値）。	RCP4.5 （2050年までは RCP6.0にも近い）
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しない中～高位参照シナリオ。エーロゾルなどCO_2以外の排出が多い。	RCP6.0と RCP8.5の間
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない高位参照シナリオ。	RCP8.5

（2021年8月9日付報道発表「参考資料」より）

図 2.2-1　気候変動に関する将来予測シナリオ [1)]（出典：環境省，2022）

2.3　国内における CR 関連政策

2.3.1　日本の気候変動対策

日本でも、図 2.3.1-1 に示したように、具体的な温室効果ガス（GHGs）の削減目標が提示されている。2030 年では、昨年の発表で 2013 年度比で 26%から 46%の削減目標に上方修正し、かつ 2050 年の目標はパリ協定時点の－80%からカーボンニュートラル（－100%）を目指すことが宣言された。

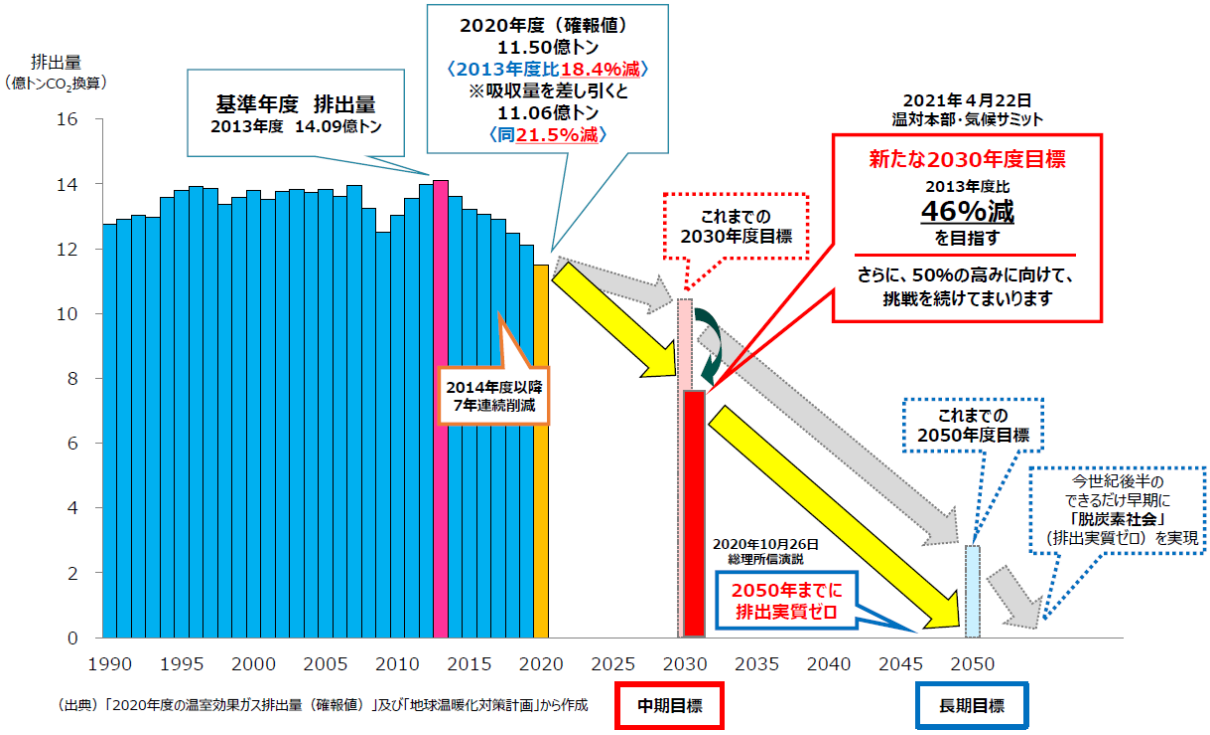


図 2.3.1-1　日本における温室効果ガス（GHGs）削減目標 [2)]（出典：環境省，2022）

図 2.3.1-2 には、日本国内の一次エネルギー供給を図示している。2050 年カーボンニュートラルを実現するためには、電力分野で再生可能エネルギーや原子力由来のゼロカーボン電源を最大限導入するだけではなく、CCS 付の火力発電を活用しながら、BECCS や DACCS、植林や鉱物化（コンクリート CCU を含む）等のネガティブエミッション技術（NETs）も活用することが必須になっている。

図 2.3.1-3 に、2030 年エネルギーミックスから 2050 年カーボンニュートラルに向けた全体システムを図示している。これをみると、電力分野では非化石資源（再生可能エネルギー、原子力）とカーボンリサイクルを前提とした火力や水素・アンモニア利用によってほぼゼロカーボンが達成できる見通しであるが、非電力分野のカーボンニュートラル化に向けては、さらに非化石電源による電化や水素還元製鉄、FCV などと共に、メタネーション、合成燃料やバイオマスを最大限に利活用することが求められる。

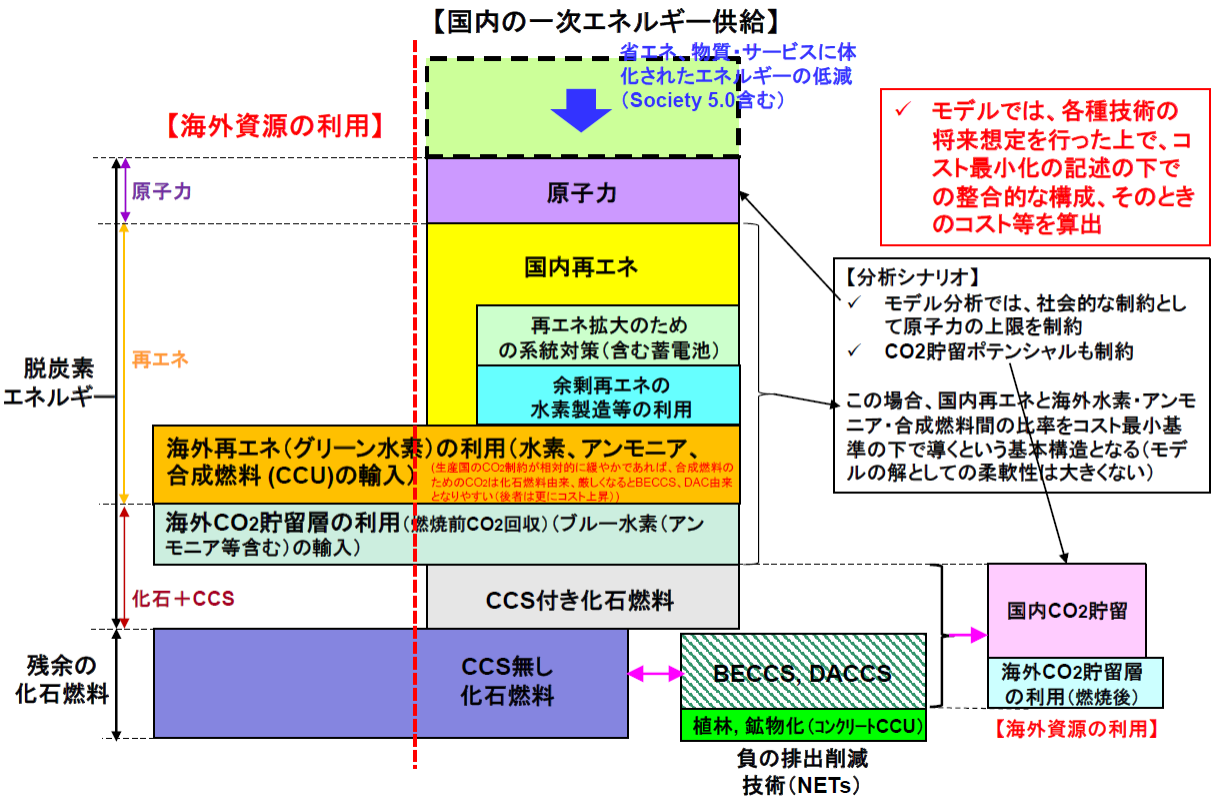
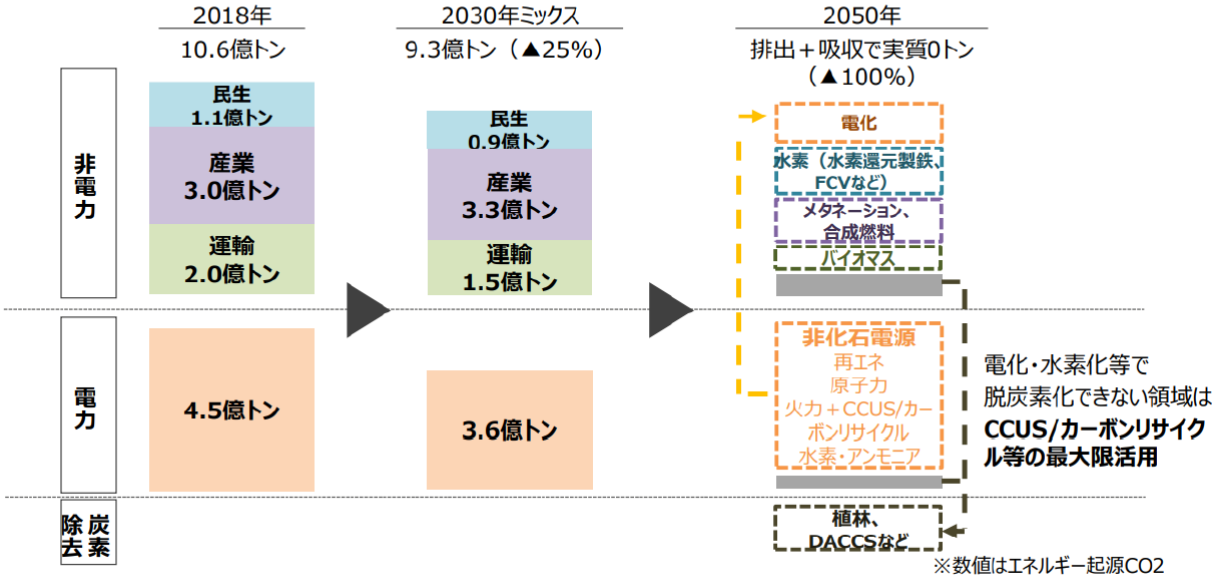


図 2.3.1-2　国内の一次エネルギー供給と脱炭素スキーム例 [3)]

（出典：経済産業省，2021）

✓ モデルでは、非電力部門も含めて全体システムとして分析
✓ 発電電力量は、[社会構造変化によるエネルギー需要の変化（社会経済シナリオによるが基本的には↓）]＋[エネルギー利用構造変化としての電力化率向上（↑）]＋[省電力による需要減（↓）]＋[非電力需要の電化（↑）]＋[VRE増加に伴う蓄電池等の電力貯蔵増によるロスの増加（↑）]＋[グリーン水素・e-fuel（合成燃料）製造用電力需要の増（↑）（ただし海外製造の場合、日本の電力需要増には寄与しない）] の複合要因で決まる。



出典）総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会，2020

図 2.3.1-3　2030 年ミックスから 2050 年カーボンニュートラルへの全体システム [4)]

（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.1-4 に、グリーンイノベーション推進戦略会議における 2050 年カーボンニュートラルのケーススタディ結果をまとめている。1.5℃シナリオを達成するための正味ゼロ排出（カーボンニュートラル）を達成するためには、電力・産業分野でのゼロカーボンエネルギーへの転換だけでなく、BECCS や植林等のバイオマス利活用、水素還元製鉄等の産業部門での水素の最大限利用拡大に加えて、国内での CO_2 貯留を拡大し、DACCS 利活用ケーススタディに加えて、国外への CO_2 輸送や DACCS を想定したシナリオが設定されている。

以上述べてきたように、2030 年のエネルギーミックスからさらに 2050 年カーボンニュートラルを実現するためには、電力の非化石化や水素化（ゼロカーボン電源化）だけでは達成できない部分は、あらゆる炭素除去（CDR：Carbon Dioxide Removal）技術を電力・非電力分野での積極的なセクターカップリングを含めて網羅的に、かつ可能な範囲で導入することが必須になっている。また、同時に、民生・住居・運輸分野等を含めた全てのセクターにおいて最大限の省エネルギーを達成することが必要不可欠であることは言うまでもない。

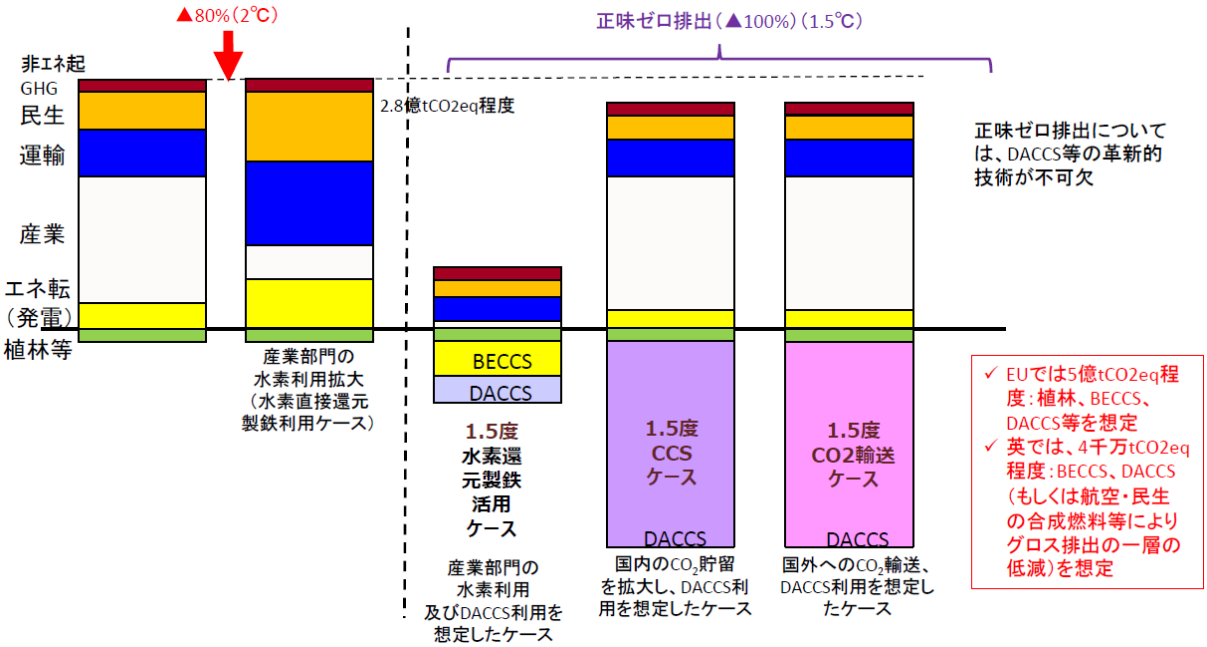


図 2.3.1-4　グリーンイノベーション推進戦略会議における 2050 年カーボンニュートラルケーススタディ[5)]（出典：経済産業省，2020）

2.3.2　地球温暖化対策としての CR 関連政策

図 2.3.2-1 に、2023 年に改訂されたカーボンリサイクルロードマップを示した。この改訂では、燃料分野での e-fuel、SAF、MTG 等の液体燃料およびガス燃料（都市ガス代替のメタンや LP ガス代替のプロパン、ジメチルエーテル）だけでなく、鉱物分野でのコンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物等、およびその他分野でのネガティブエミッション（BECCS、ブルーカーボン/マリンバイオマス、風化促進、植物利用等）技術を追加している。

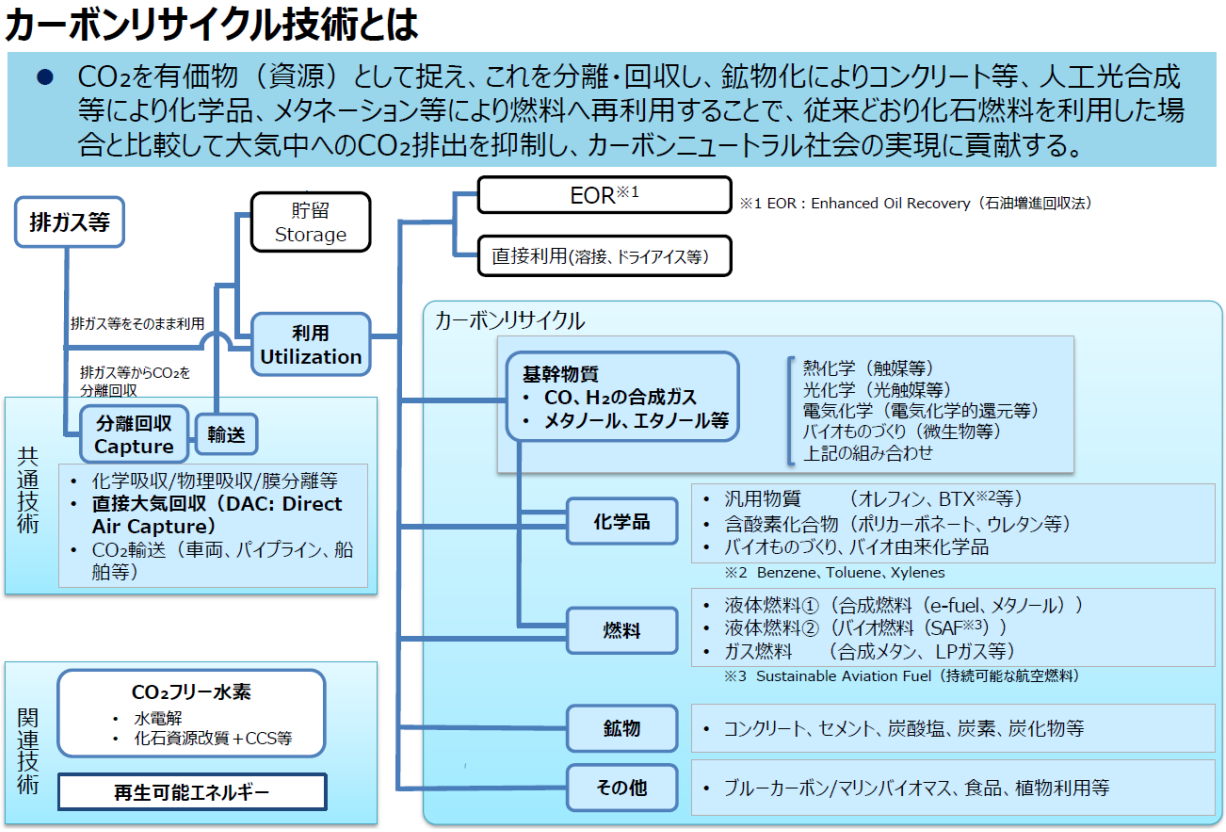


図 2.3.2-1　カーボンリサイクルロードマップ改訂版（2023.6）[6)]

（出典：経済産業省，2023）

図 2.3.2-2 には、カーボンリサイクルを拡大していく絵姿を示した。鉱物・コンクリート分野のロードマップ（絵姿）に注目してみると、現状では高価なカーボンリサイクル製品（道路ブロック等）を低コスト化しながら、2030 年のフェーズ２から普及段階に進展させ、さらに 2040 年以降のフェーズ３に向けては他の汎用品を含むコンクリート製品へ用途拡大と共に低コスト化を図っていくことが期待されている。

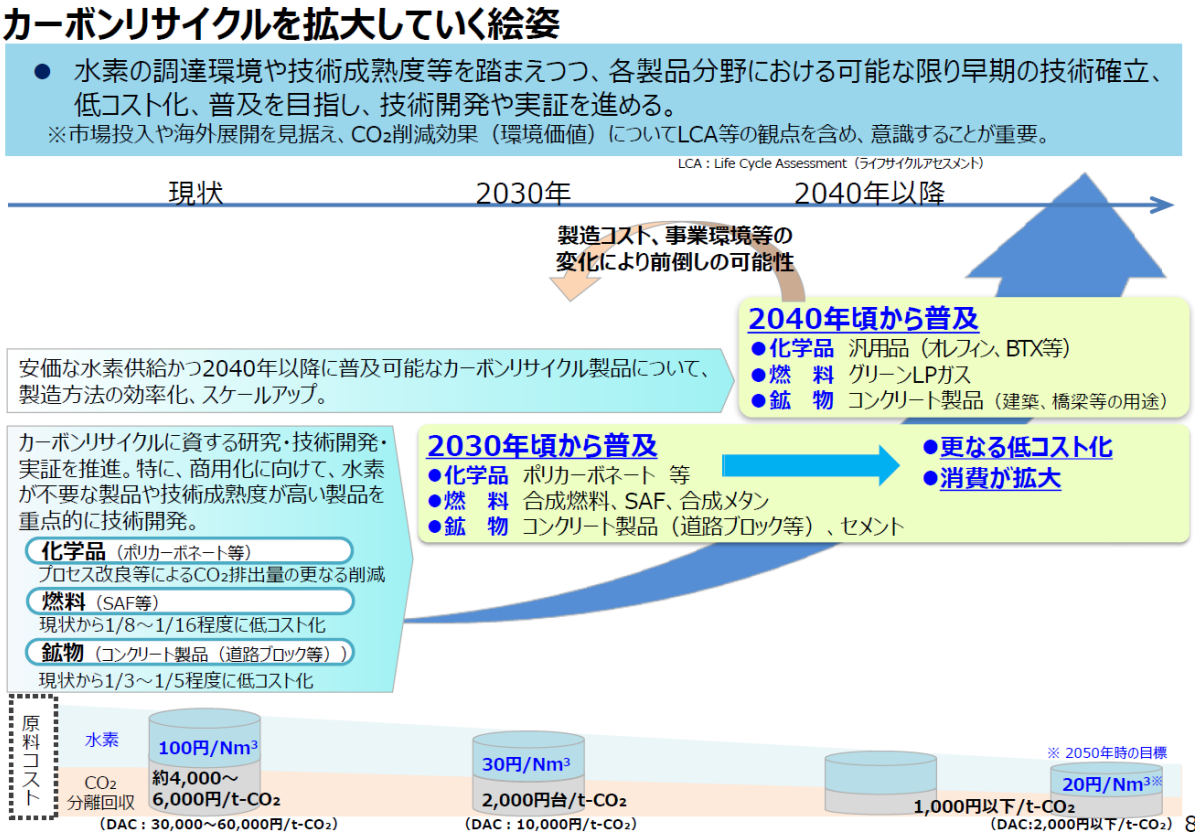
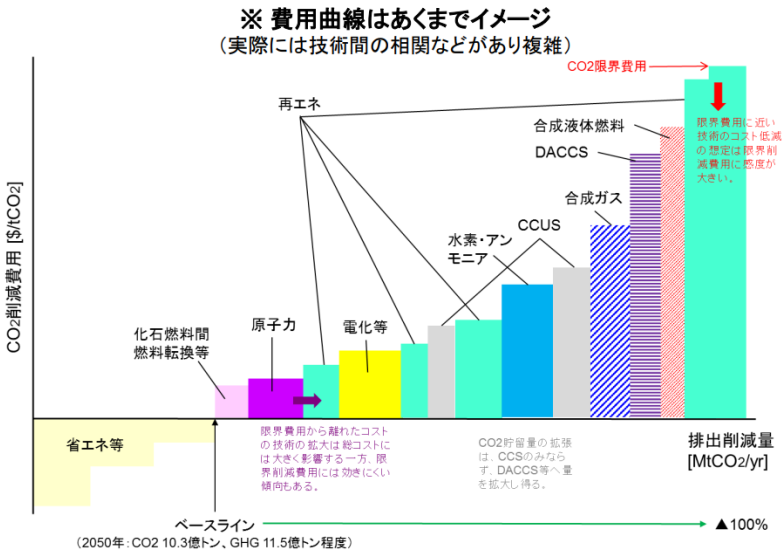


図 2.3.2-2　カーボンリサイクルを拡大していく絵姿 [6]（出典：経済産業省，2023）

2.3.3　日本の CR 推進事業

日本のカーボンリサイクル推進事業は、グリーンイノベーション戦略に基づいた基金を活用して既に多方面の領域で実証に向けたプロジェクトが推進されている。本報告書では、主に、火力発電所由来 CO_2 の利用に関するカーボンリサイクル技術動向と土木分野における課題を明らかにすることを目指しているので、以降はその分野を中心として取り上げていくこととする。

図 2.3.3-1 に、主としてエネルギー領域における CO_2 削減の費用対効果のシナリオを比較して示している。2050 年のカーボンニュートラル実現に向けては、再生可能エネルギー極大とイノベーション、原子力の活用、水素利用のイノベーション、CCUS 活用、およびカーシェアリング等による需要低減ケースを参考として、省エネルギーを前提としたベースラインから CO_2 限界費用までの費用曲線を見ると、化石燃料の転換から、原子力、再生可能エネルギーによる電化、水素・アンモニア利用、CCUS、合成ガス、DACCS、合成液体燃料などに至るまでほぼすべての項目でのエネルギーシステムコストを考慮した CO_2 削減費用を評価して見積もる必要がある。



[面積にあたるコスト]:
[▲100%のエネルギーシステム総コスト]－[ベースラインのエネルギーシステム総コスト]

	エネルギーシステムコスト*1 (billion US$/yr)	
参考値のケース	1179	—
①再エネ極大	1284	(+106)
②再エネイノベ	1142	(-37)
③原子力活用*2	1166～1133	(-13～-45)
④水素イノベ	1160	(-19)
⑤CCUS活用	1150	(-29)
⑥カーシェアリングにより需要が低減するケース	909	(-270)

*1：括弧書きの数値は参考値のケースからの変動分
*2：原子力活用シナリオは、原子力比率20%および50%の下での結果

図 2.3.3-1　CO_2 削減費用対効果のシナリオ比較 [3)]（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-2 には、カーボンリサイクルにおける重点 14 分野をリストアップしている。この中で、本 CR 分科会に関連する項目を中心に説明する。エネルギー関連産業、輸送・製造関連産業、及び家庭・オフィス関連産業から 14 項目が挙げられているが、その中でここでは、⑧物流・人流・土木インフラ産業および⑪カーボンリサイクル・マテリアル産業について取り上げる。

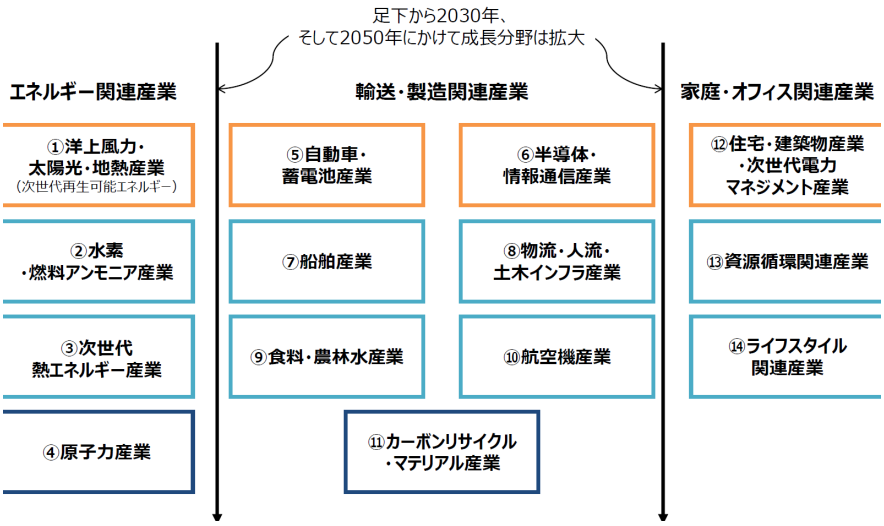


図 2.3.3-2　カーボンリサイクルにおける重点 14 分野リスト [7)]

（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-3 には、⑧物流・人流・土木インフラ産業の成長戦略工程表を示している。その中で、インフラ・都市空間等でのゼロエミッション化の工程表では、都市における脱炭素化、都市公園への再生可能エネルギーの導入促進、グリーンインフラの社会実装、Eco-DRR（Disaster Risk Reduction）等が取り上げられている。さらに、建設施工におけるカーボンニュートラルの実現に向けては、目標規模 571 万トン CO_2 を 2050 年にゼロにすることが示されている。

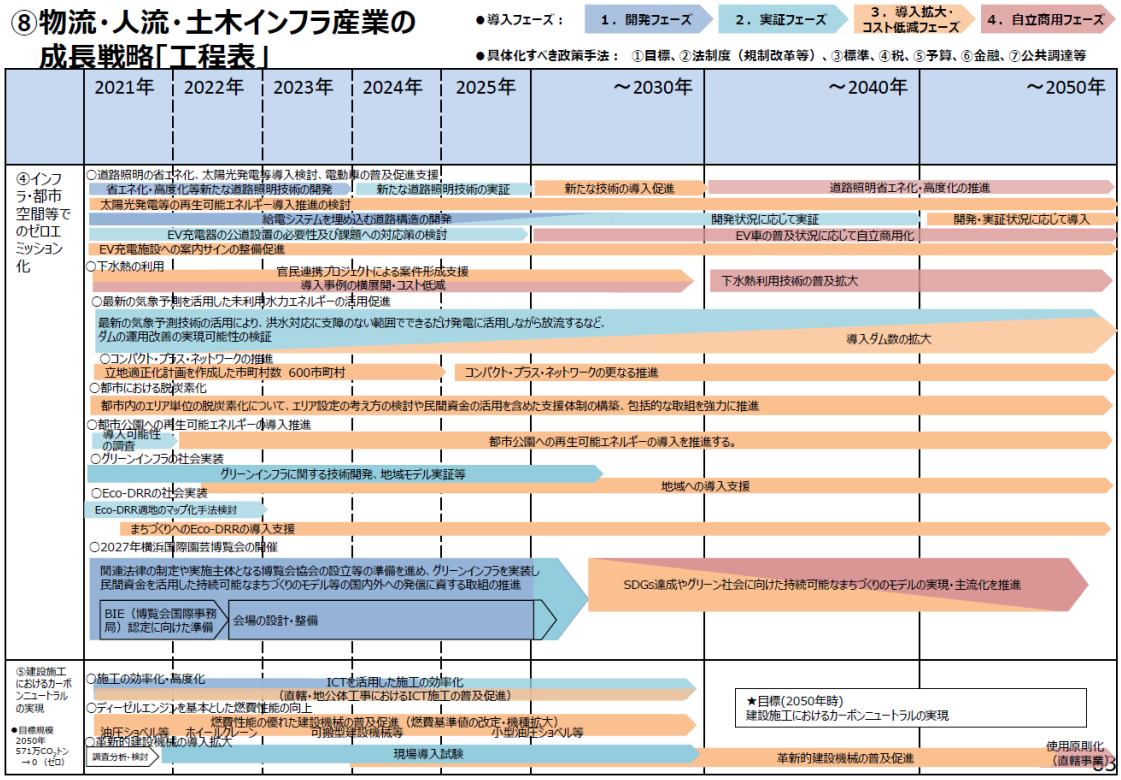


図 2.3.3-3　物流・人流・土木インフラ産業の成長戦略工程表 [7)]

（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-4 に、カーボンリサイクル・マテリアル産業におけるコンクリート・セメントの概要をまとめた。カーボンリサイクルは、CO_2を資源として有効利用することが重要であり、その中で日本に競争力があり、コスト低減、社会実装を進め、グローバル展開を目指す上では、コンクリート・セメント分野の貢献が大きい。現状では、CO_2を吸収して製造するコンクリートは実用化済みであるが、例えば CO_2-SUICOM はコストが高く、CO_2吸収量が限定的で、コンクリート中の鉄骨が錆びやすく、用途が限られている。従って、今後の取組みとして、公共調達を活用し、販路拡大とコスト低減を実現することが挙げられている。更なる販路拡大においては、2025 年の日本国際博覧会での導入や国際標準化を通じたアジアへの導入促進、ならびに防錆性能を持つ新製品の開発による建築物やコンクリートブロックへの用途拡大や CO_2吸収量の増大と低コスト化を両立させた新技術・製品の開発と知財戦略によるシェア獲得が目標とされている。また、石灰石の燃焼時の CO_2発生における大量 CO_2回収技術が確立されていないことから、今後の取組みとして新たな製造プロセスの確立と炭酸塩の利用拡大に向けて、2030 年までに石灰石からの 100%CO_2回収技術と共に、炭酸塩の利用拡大やカーボンリサイクルセメント技術を確立することが目標として挙げられている。

⑪カーボンリサイクル・マテリアル産業（カーボンリサイクル）

◆ カーボンリサイクルは、CO_2を資源として有効活用する技術でカーボンニュートラル社会実現に重要。日本に競争力があり、コスト低減、社会実装を進め、グローバル展開を目指す。（IEAは、2070年のCCUSによるCO_2削減量は世界で約69億トン/年と予測。）

	現状と課題	今後の取組
コンクリート・セメント	**CO_2を吸収して造るコンクリートは実用化済だが、市場が限定的** ・現状のCO_2-SUICOMはコスト高。（＝既存コンクリートの約3倍の100円/kg） ・CO_2吸収量が限定的、コンクリートの中の鉄骨が錆やすいため（CO_2吸収により酸化しやすくなるため）、用途限定。	**公共調達を活用し販路拡大・コスト低減** ・コスト目標として、2030年に、需要拡大を通じて既存コンクリートと同価格（=30円/kg）を目指す。2050年に、防錆性能を持つ新製品を建築用途にも使用可能とする。 ・市場規模は、2030年時点で、世界で約15～40兆円を見込む。 ①公共調達による販路拡大 ・新技術に関する国交省データベース（NETIS）にCO_2吸収型コンクリートを登録。国・地方自治体による**公共調達**を拡大。2025年日本国際博覧会でも導入を検討。さらに、**国際標準化**を通じ、アジアへの販路も拡大。 ②更なる販路拡大 ・防錆性能を持つ新製品を開発。建築物やコンクリートブロックに用途拡大。**標準化等導入に向けた支援**による民間部門での需要拡大を検討。 ・CO_2吸収量の増大と低コスト化を両立させた新技術・製品の開発と知財戦略を通じたライセンス事業形態の活用によるシェア獲得・拡大。
	石灰石の燃焼時にCO_2が発生、しかし大量のCO_2回収技術が未確立 ・キルンから１日当たり数千トンのCO_2が発生。現行技術（化学吸収法）では大規模化。 ・炭酸塩化技術もCO_2利用量が少なく、またカルシウム源も限定的。	**新たな製造プロセスの確立・炭酸塩の利用拡大** ・2030年までに、石灰石からの排出CO_2を**100%近く回収する技術の確立**を目指す。廃棄物等を用いた炭酸塩やカーボンリサイクルセメント技術を確立し、炭酸塩の利用拡大を図る。 ・2050年までに、**国内工場への導入**や東南アジア等のプラントとの技術協力、**カーボンリサイクルセメントの普及拡大**を目指す。

図 2.3.3-4　カーボンリサイクル・マテリアル産業におけるコンクリート・セメント概要 [7)]

（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-5 にはコンクリート・セメントとカーボンリサイクル分野、図 2.3.3-6 にはカーボンリサイクル化学品と分離回収分野のカーボンリサイクル・マテリアル産業の成長戦略「工程表」が各々まとめられている。

コンクリート分野ではコスト目標として 2030 年までに 30 円台/m^3（既製品と同等）、セメント分野では国内キルンでの全機導入が目標とされ、それに向けた具体的な工程表が示されている。さらに、コンクリート分野では 2040 年以降には途上国等への販路拡大や知財戦略によるシェア獲得・拡大、セメント分野では設備導入コスト低減や国内・アジアメーカーへの技術展開などが挙げられている。

カーボンリサイクル分野では、燃料において代替航空燃料 : SAF（Sustainable Aviation Fuel）、合成燃料・合成メタン・グリーン LPG のコスト目標と共に、2040 年以降の SAF の供給拡大、合成燃料等の商用化とより一層のコスト削減目標が掲げられている。

また、カーボンリサイクル化学品と分離回収分野では、プラスティック原料製造の大規模実証に必要な高生産性の光触媒の開発、廃プラスティック・廃ゴムや CO_2 からのより高機能な化学品製造技術の開発、バイオマス資源を原料とするバイオものづくり技術の開発・実証、ならびに大気中の CO_2 を原料とした化学品の直接合成を目指したバイオものづくり技術の開発・実証等の 2030 年までの工程表が示されている。2040 年以降では、いずれの技術開発においても、大規模実証とコスト低減・補助金等による導入支援及び商用的拡大が目標とされている。分離回収分野では、2030 年の t-CO_2 当りのコスト目標として低圧ガスでは 2 千円台、高圧ガスでは千円台、DAC では 2050 年目標として 2 千円台が挙げられている。特に、大気からの直接 CO_2 回収（DAC）技術の開発では、2030 年までムーンショット型研究開発制度等を活用してエネルギー効率の向上とコスト削減を目指し、2040 年以降に実証と更なる低コスト化による導入拡大を図る目標が掲げられている。

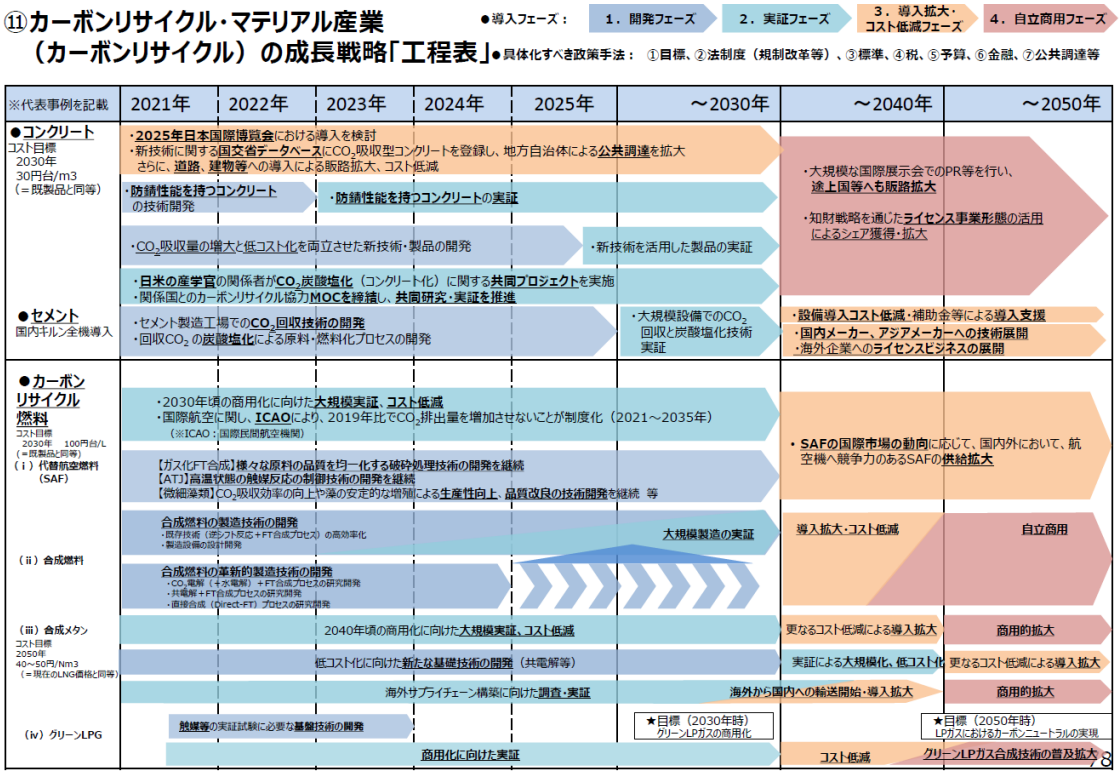


図 2.3.3-5　カーボンリサイクル・マテリアル産業の成長戦略「工程表」（コンクリート・セメントとカーボンリサイクル）[7)]（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-6　カーボンリサイクル・マテリアル産業の成長戦略「工程表」（カーボンリサイクル化学品及び分離回収）[7)]（出典：経済産業省，2021）

図 2.3.3-7 には、カーボンリサイクル・マテリアル産業（マテリアル）の成長戦略「工程表」を示した。ここでは、金属素材、精錬・圧延手法、資源の有効利用、熱源の脱炭素化、および石油化学コンビナートの脱炭素化の工程表がまとめられている。金属素材分野では、輸送用機械の軽量化・高速化・電動化に資する金属素材の開発と導入・拡大が取り上げられ、精錬・圧延手法では水素還元製鉄、電炉拡大に向けた技術開発と大規模実証に向けた技術確立、導入支援が目指されている。資源の有効利用では、特に希少金属の抽出・回収と再利用・再資源化を可能にするリサイクル技術の開発が指向され、高強度材料による構造物の長寿命化技術の開発やアルミスクラップをアップグレードするリサイクル技術の開発と実証・導入拡大も重要視されている。熱源および石油化学コンビナートの脱炭素化では、それぞれ各種熱源の燃焼特性に合わせた製造設備の開発・実証、ナフサ分解炉等の設備最適化や石油精製プロセスへの CO_2 フリー水素等の導入実証と拡大が指向されている。

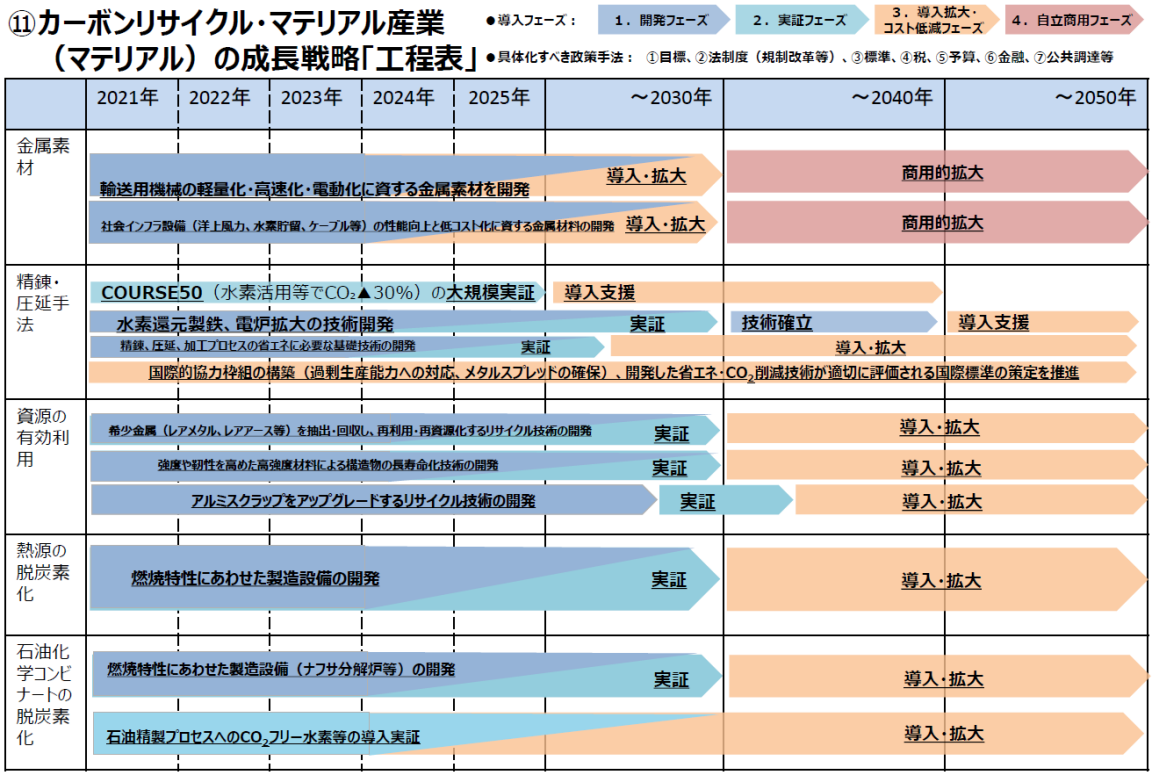


図 2.3.3-7　カーボンリサイクル・マテリアル産業（マテリアル）の成長戦略「工程表」[7)]
（出典：経済産業省，2021）

上述したようなカーボンニュートラル（CN）実現に向けたエネルギートランジションのイメージと取組み事例を図 2.3.3-8 にまとめた。電力・熱分野では、まず経済性の高い省エネルギー対策を実施することを前提とし、例えば大企業や製紙業等では化石資源から廃棄物利用への転換を図ることが求められる。電力では、特に再生可能エネルギー導入拡大や原子力利用による系統電力のカーボンニュートラル化を図りながら、火力発電燃料の低炭素化（天然ガスシフトを含む）と共に、水素・アンモニア、バイオマス利用（混焼を含

む）による脱炭素化を促進することが必要である。

その中で、石炭ガス化複合発電と CO_2 の分離・回収技術を組み合わせた石炭火力発電の実証試験を行う広島県大崎上島の大崎発電所（大崎クールジェン㈱：OCG）は、隣接するカーボンリサイクル実証研究拠点（NEDO）との連携で注目されている[8]。OCG では、CO_2 を農業施設に提供したり他の様々な CCU 研究を進めており、研究成果のみでなく、CR を実施するための CO_2 及びエネルギーを供給する有望なビジネスモデルになると期待されている。

熱分野でも同様に低炭素化と脱炭素化を進めると共に、熱交換機やヒートポンプ設備等の利活用による中小企業や食品製造業等における熱需要の省エネルギー化を図ることが重要になる。

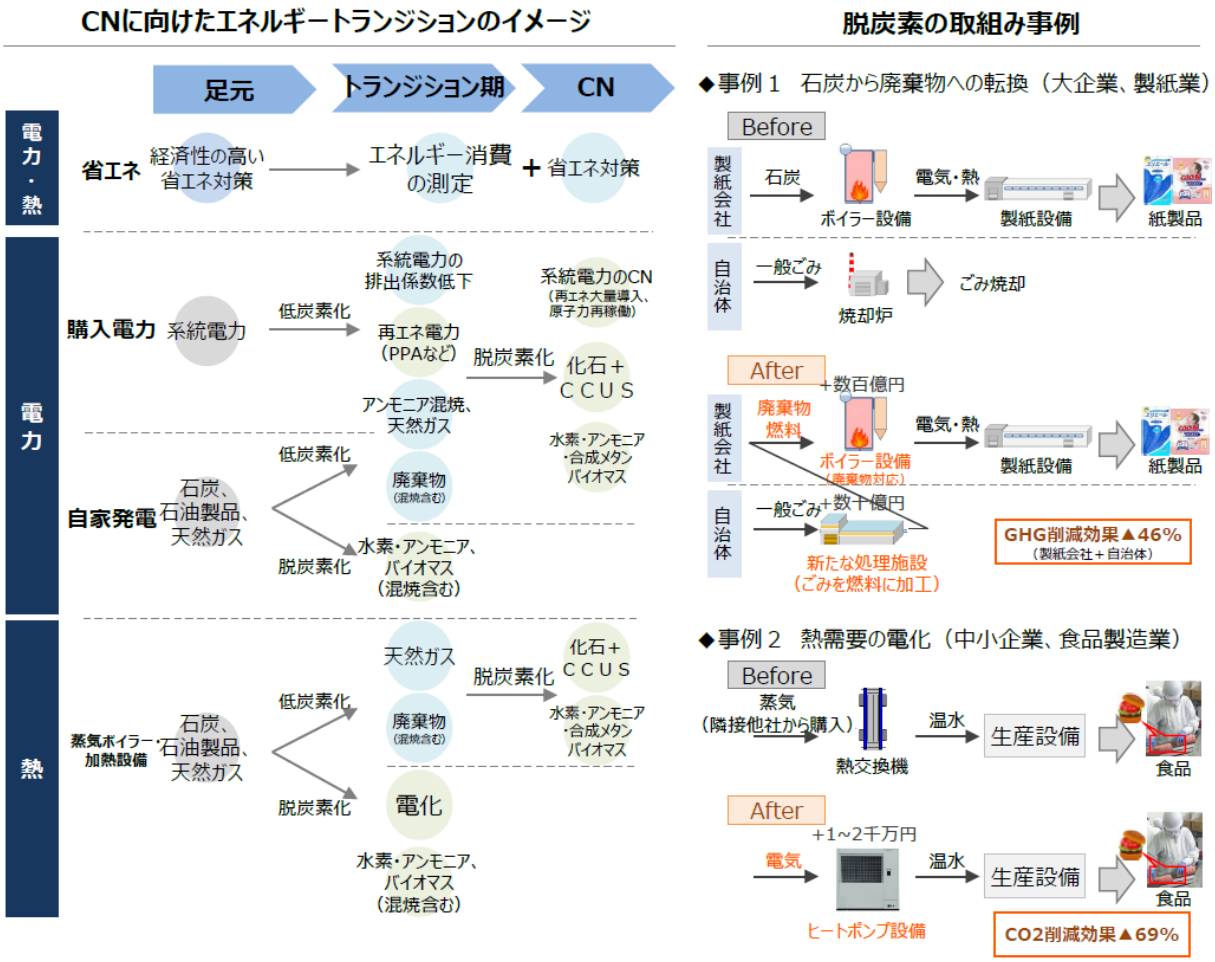


図 2.3.3-8　CN に向けたエネルギートランジションのイメージと取組み事例[9]

（出典：経済産業省，2022）

2.3.4　CR 分野の国際連携

地球規模の気候変動を防止するためには、日本を含む先進国だけが GHGs 削減によるカーボンニュートラルを実現しても効果が無いことは自明の理であり、途上国を含めて全世界的に CO_2 削減を実現することを目指したカーボンリサイクル分野の国際連携が必要不可欠である。特に、人口の多い中国やインドを含むアジア地域では GHGs 排出量が増えており、日本がアジア地域での GHGs 排出量の大幅な削減に貢献することが重要である。従って、2050 年カーボンニュートラルを目指す日本がその産業構造を転換することによって、アジア地域全体、ひいては世界的な GHGs 排出量が削減されないような状況は望ましくないといえる。このような観点で、カーボンリサイクル分野での国際連携の方向性を検討する必要がある。

日本の産業構造の転換におけるサプライチェーン維持の視点を図 2.3.4-1 に示した。日本では、鉄、化学、セメント、紙といった素材系の分野はエネルギー利用に占める熱・燃料（原料を含む）需要が大きい一方で、製品の輸入依存度は低いため、仮にこれらの製品を海外依存することになった場合のサプライチェーン上の懸念を考慮に入れる必要がある。特に、セメント業においては、エネルギー最終消費の熱・燃料比率が 88%と高く、かつ日本のセメント消費に占める輸入の割合が 0.04%と極めて小さいことが分かる。これは、他の化学産業や鉄鋼業でも同様の傾向であるが、セメント業では他の産業に比べて国際輸出額が 110 億ドルと非常に小さいことが特徴的である。

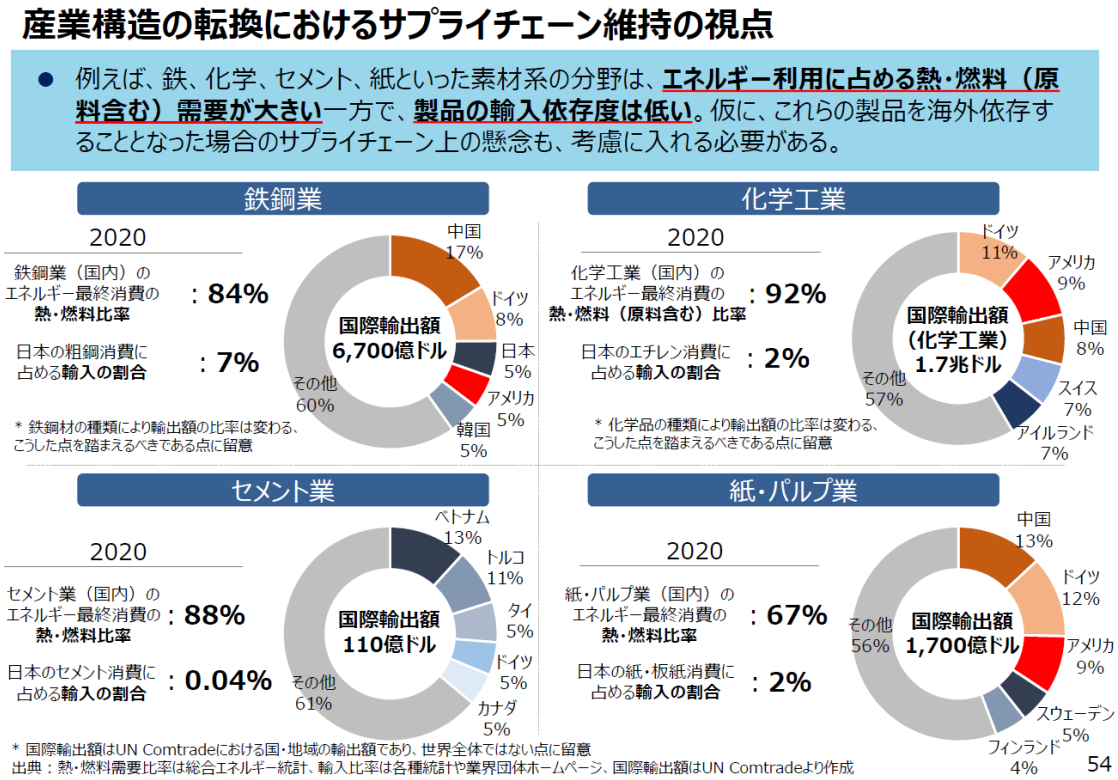


図 2.3.4-1　産業構造の転換におけるサプライチェーン維持について [10)]

（出典：経済産業省，2022）

図 2.3.4-2 には、アジア・ゼロエミッション共同体構想をまとめている。日本では、AETI（アジア・エネルギートランジション・イニシアティブ）や日 ASEAN 気候変動アクション・アジェンダ 2.0 を強化・具体化しつつ、アジア有志国と連携強化して、「アジア・ゼロエミッション共同体」構想の実現を目指している。この構想では、①ゼロエミッション技術の開発（トランジションのロードマップ策定支援、カーボンニュートラル長期戦略、適応計画等策定支援など）、②国際共同投資、共同資金調達（アジア版トランジションファイナンス・ルールの策定、アジア CCUS ネットワークの構築など）、③技術等の標準化（グリーン成長につながる国際標準策定、再生可能エネルギー・エネルギーマネージメント推進事業など）、④カーボンクレジット市場（パリ協定６条（市場メカニズム）のルールに基づいた政策等の実施；市場メカニズムの早期実施支援、JCM パートナー国の拡大と JCM プロジェクトの大規模化など）の４項目について、アジアのゼロエミッションへの移行を支えるエネルギー安全保障強化に向けた連携を推進することが提案されている。

このようなアジア・ゼロエミッション共同体構想は、アジア域内に限られるだけでなく、APEC や EU 諸国との世界的な共同体連携への展開に加えて、アフリカ諸国を含む発展途上国を加えた枠組みへの拡大が期待される。

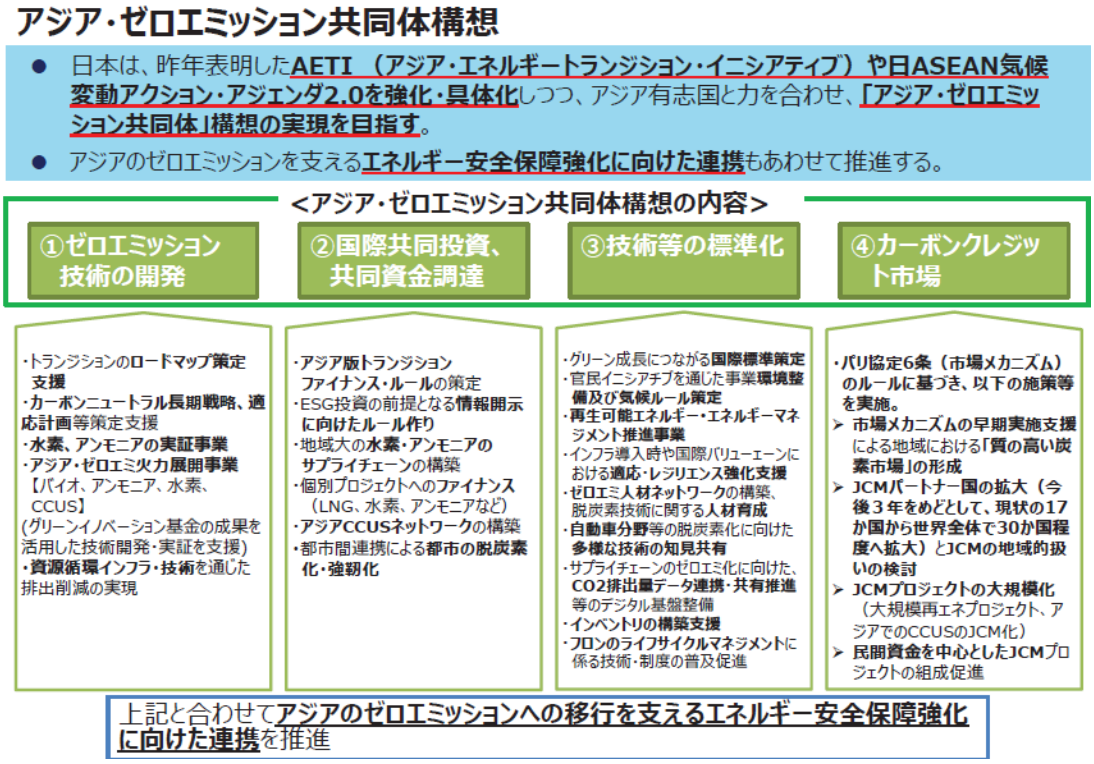


図 2.3.4-2　アジア・ゼロエミッション共同体構想について [10)]

（出典：経済産業省，2022）

表 2.3.4-1 には、世界と日本の人口、GDP、粗鋼・セメント生産量等の比較データをまとめている。既に 80 億を超えた世界の人口は、2050 年以降 2100 年頃には 100 億に迫り、

それを支える GDP、粗鋼・セメント生産量、及び道路部門の旅客輸送需要等が増大していくことが予想されている。日本や先進国では人口が減少し、GDP や粗鋼・セメント生産量が漸増するとみられているが、COP27 での議論でも全世界的な GHGs 削減に向けての取組みは待った無しの状況であることは明らかである。

表 2.3.4-1　世界と日本の人口、GDP、粗鋼・セメント生産量等の比較 [3)]

（出典：経済産業省，2021）

【世界】

	2030年	2050年	2100年
人口（億人）	**83.6** (81.4-85.9)	**92.1** (86.1-100.5)	**93.1** (70.0-127.3)
GDP（%／年）	**2.7** (2.4-3.1) [2010年～]	**2.2** (1.3-2.8) [2030年～]	**1.4** (0.6-2.2) [2050年～]
粗鋼生産量（億トン）	**19.6** (18.8-20.0)	**21.3** (19.3-22.7)	**22.9** (14.7-26.5)
セメント生産量（億トン）	**41.6** (39.0-43.0)	**44.0** (38.5-46.6)	**44.7** (29.4-59.1)
道路部門の旅客輸送需要（兆p-km）	**30.2** (31.2-37.3)	**60.0** (56.8-74.2)	**83.3** (66.8-88.8)

【日本】

	2030年	2050年	2100年
人口（億人）	**1.18** (1.16-1.26)	**1.02** (0.96-1.22)	**0.84** (0.47-1.05)
GDP（%／年）	**1.6** (1.3-1.9) [2010年～]	**0.4** (-0.1-1.2) [2030年～]	**0.4** (-0.9-1.5) [2050年～]
粗鋼生産量（億トン）	**0.90** (0.81-0.97)	**0.95** (0.73-1.11)	**0.85** (0.45-0.90)
セメント生産量（億トン）	**0.54** (0.50-0.68)	**0.44** (0.31-0.75)	**0.40** (0.23-0.65)
道路部門の旅客輸送需要（兆p-km）	**0.77** (0.69-0.85)	**0.64** (0.61-0.82)	**0.61** (0.51-0.70)

注）括弧内は、SSP1～5までのシナリオの幅。なお、エネルギー需要や発電電力量はモデルで内生的に計算される。

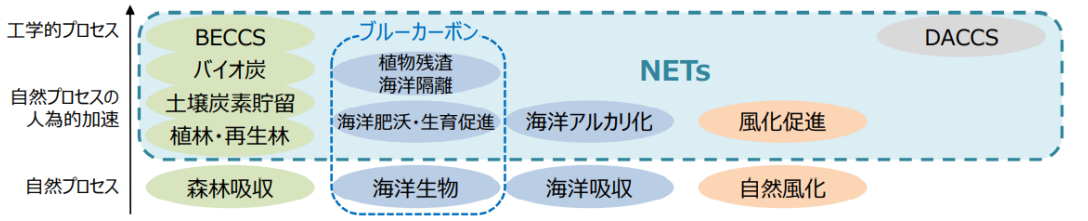
2.3.5　今後の政策的課題

今後のカーボンリサイクル分野における政策的な課題として、大気中の CO_2 を回収・吸収し、貯留・固定化することで大気中の CO_2 の除去（CDR: Carbon Dioxide Removal）に資するネガティブエミッション技術の開発を加速することが挙げられる。

図 2.3.5-1 に、ネガティブエミッション技術（NETs）の概要をまとめている。NETs の中には、植林・再生林、土壌炭素貯留、バイオ炭に加えて、BECCS、DACCS、風化促進、ブルーカーボン、海洋アルカリ化等が挙げられている。

- ネガティブエミッション技術(NETs)とは，大気中のCO_2を回収・吸収し，貯留・固定化することで大気中 のCO_2除去 (CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する技術
- 自然のCO_2吸収・固定化の過程に、人為的な工程を加えることで加速させる技術やプロセス(狭義)

植林・再生林		植林は新規エリアの森林化、再生林は自然や人の活動によって減少した森林の再生・回復。
土壌炭素貯留		バイオマス中の炭素を土壌に貯蔵・管理する技術（バイオ炭を除く）
バイオ炭		バイオマスを炭化し炭素を固定する技術
BECCS		バイオマスエネルギー利用時の燃焼により発生したCO_2を回収・貯留する技術
DACCS		大気中のCO_2を直接回収し貯留する技術
風化促進		玄武岩などの岩石を粉砕・散布し、風化を人工的に促進する技術。風化の過程(炭酸塩化)でCO_2を吸収
ブルーカーボン	海洋肥沃・生育促進	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してCO2吸収・固定化を人工的に加速する技術。大気中からのCO_2の吸収量の増加を見込む。
	植物残渣海洋隔離	海洋中で植物残渣に含まれる炭素を半永久的に隔離する方法（自然分解によるCO_2発生を防ぐ）ブルーカーボンのみならず外部からの投入を含む
海洋アルカリ化		海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法



出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料, (2022), 各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSC作成資料を一部修正

図 2.3.5-1　ネガティブエミッション技術の概要 [11]（出典：経済産業省，2022）

図 2.3.5-2 には、ネガティブエミッション技術のポテンシャル比較をまとめている。各技術の TRL（Technology Readiness Levels：技術成熟度）、CO_2 削減コスト及び削減ポテンシャル（ともに 2050 年想定の中央値）、土地利用（年間 1 トンの CO_2 削減に必要な面積）、削減効果の確認（CO_2 削減効果の確認とコンセンサスの有無）、ならびに日本での実施の優劣（諸外国との比較で日本での実施の優劣；例えば DACCS、BECCS では CCS が必須のため CCS 適地の点で日本は劣後）等を比較している。マテリアルとしての固定化（DAC＋炭酸塩化＋土木・建築利用、木造建築、木質素材の循環利用）は NETs とは別枠の扱いになっているが、ICEF2020 で提唱された BiCRS（Biomass with Carbon Removal and Storage [12]；図 2.3.5-3 参照）では、バイオマス利活用の中で土木・建築利用や木造建築、木質素材の循環利用が含まれている。

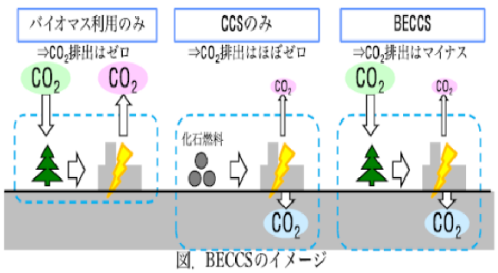
技術比較

分類	TRL	削減コスト $/tCO_2 *1		削減ポテンシャル $GtCO_2$/年 *2		土地利用 *3 m^2/tCO_2/年	削減効果の確認 *4	日本での実施の優劣 *5
海洋アルカリ化	3	305	10~600	11.0	2~20	0	要	○
海洋肥沃化	3	67	23~111	4.4	2.6~6.2	0	要	○
植物残渣海洋隔離	2	72	50~94	0.9	0.7~1	0	済	○
風化促進	4	128	50~200	3.0	2~4	29	要	○
DACCS	6	172	30~600	3.5	1~6	4	済	△
BECCS	7	135	60~200	5.6	0.5~15	379	済	△
植林・再生林	9	28	5~50	2.3	0.5~3.6	978	済	○
土壌炭素貯留	7	28	-45~100	4.1	0.4~8.6	0	要	○
バイオ炭	6	75	30~120	2.6	0.3~75	580	済	○
マテリアルとしての固定化（DAC+炭酸塩化＋土木・建築利用、木造建築、木質素材の循環利用）								

*1:2050年想定のCO_2削減コストの中央値
*2:2050年の世界の削減ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり。
*3:年間1トンのCO_2削減に必要な面積、植林・再生林978は北海道全体(8.3万km2)で0.85億tCO_2/年の削減に相当、PVは10程度(効率18%，稼働率12%，0.5kgCO_2/kWhの電力を代替の場合)
*4:CO_2削減効果が確認されコンセンサスを得ているか
*5:諸外国との比較で日本での実施の優劣、DACCSとBECCSはCCSが必須でCCS適地の点で日本は劣後
出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料，(2022)，各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSC作成資料を一部加筆

図 2.3.5-2　ネガティブエミッション技術のポテンシャル比較 [11]

（出典：経済産業省，2022）



図．BECCSのイメージ

（出典：環境省，2022）[13]

Bioenergy with CCS (BECCS)
‖
炭素中立なバイオマス
×
CO_2隔離貯留
↓
大気中のCO_2除去

BiCRS (Biomass Carbon Removal and Storage)

- バイオマスを用いて大気中からCO_2を除去し
  そのCO_2を地下または耐久消費財に貯蔵
  ⇒ バイオマス資源へのCO_2固定を含む

（出典：ICEF2020）[12]

図 2.3.5-3　BiCRS(Biomass Carbon Removal and Storage)の概念図

図 2.3.5-4 および図 2.3.5-5 に、BECCS および DACCS のポテンシャルと国内外の動向を示した。BECCS では、一般にバイオマス発電と CCS（または EOR）を組み合わせた技術で、大気中の CO_2 をバイオマスとして固定化し、エネルギーなどで活用しながら、発生する CO_2 の貯留を組み合わせてネガティブエミッションを実現することを目指している。バイオマスからの水素製造やバイオプロセスで発生する CO_2 を対象とする場合や炭酸塩化との組合せで固定化する技術も BECCS に含まれる場合がある。現在のところ、CO_2 回収量で 100 万トン/年規模（エタノール発酵で発生する CO_2 が対象）を含めて、複数の BECCS が北米で稼働している。

BECCS の長所は、バイオマス発電/分離回収/CCS はほぼ完成された技術であり、持続可能なエネルギー共有とネガティブエミッションを両立できると共に、永久貯留と削減効果の検証が容易であることである。一方、短所は CO_2 削減コストが比較的高く、日本での実施の場合は CCS サイトや必要面積が大きくなること等が挙げられている。

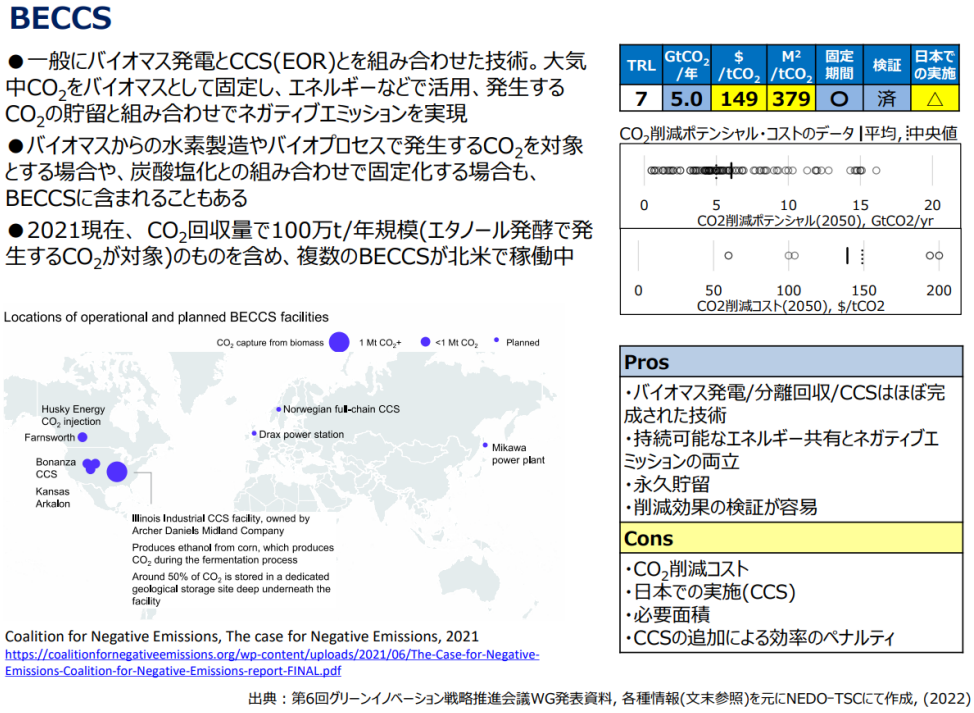


図 2.3.5-4　BECCS のポテンシャルと国内外の動向 [11)]（出典：経済産業省，2022）

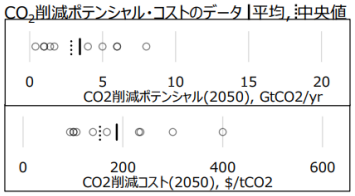
DACCS は、工学的プロセス（DAC）で回収した大気中の CO_2 を、一般的には貯留（CCS）することでネガティブエミッションを実現する技術で、DAC で得られた CO_2 を炭酸塩化等で固定化する場合も含まれる。課題としては、方式（吸収液、固体吸収、膜分離、アクティブ・パッシブ等）によっても異なるが、400ppm 程度の希薄な CO_2 を回収するのに多くのエネルギー（熱や電気）が必要であるためコスト及び削減効果の点からエネルギー消費の削減が必須となっている。現状では、1.7 万トン CO_2/年の DACCS が稼働中で、100 万トン/年規模のプラントが計画されている。

DACCS

- ●工学的プロセス(DAC)で回収した大気中CO_2を、一般には貯留(CCS)することでネガティブエミッションを実現
- ●DACで得られたCO_2を炭酸塩化等で固定化する場合も、ネガティブエミッションとなる
- ●400ppm程度の希薄なCO_2の回収に多くのエネルギー(熱・電気)を消費するため、コストおよびCO_2削減効果の点からエネルギー消費削減が必須
- ●方式(吸収液・固体吸収・膜分離、アクティブ・パッシブ等)によってTRLは異なる
- ●2021現在、稼働中のDACCSの合計は1.7万tCO_2/年、2024年までに100万tCO_2/年の計画

TRL	$GtCO_2$/年	$/t$CO_2$	M^2/tCO_2	固定期間	検証	日本での実施
6	2.9	154	4	○	済	△

CO_2削減ポテンシャル・コストのデータ | 平均, 中央値

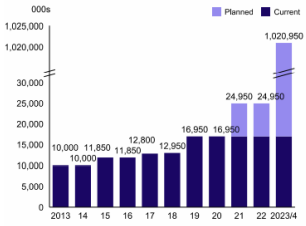


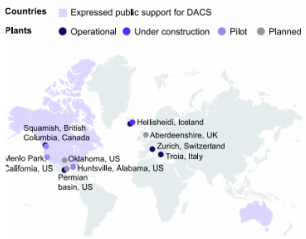
Pros

- ・貯留・固定化場所への隣接が可能
- ・必要面積が比較的少ない
- ・永久貯留
- ・削減効果の検証が容易
- ・世界市場への展開可能性(DAC)

Cons

- ・CO_2削減コスト
- ・日本での実施(CCS)
- ・エネルギー消費





Coalition for Negative Emissions, The case for Negative Emissions, 2021
https://coalitionfornegativeemissions.org/wp-content/uploads/2021/06/The-Case-for-Negative-Emissions-Coalition-for-Negative-Emissions-report-FINAL.pdf

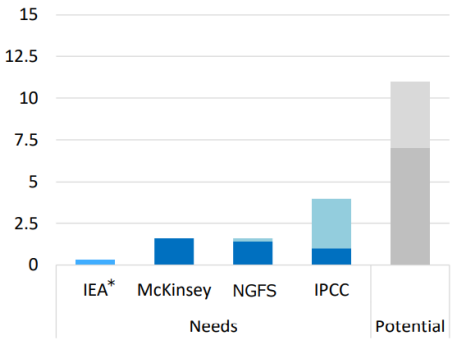
出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料, 各種情報(文末参照)を元にNEDO-TSCにて作成, (2022)

図 2.3.5-5　DACCS のポテンシャルと国内外の動向 [11]（出典：経済産業省，2022）

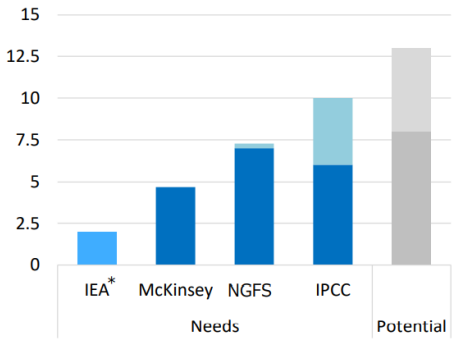
図 2.3.5-6 には、ネガティブエミッション技術のポテンシャル評価を示している。IEA や IPCC 等の各機関によって異なるが、1.5℃排出経路では、NETs の削減寄与は世界で 2030 年に 1～1.6Gt CO_2/年、2050 年に 5～7Gt CO_2（下限）で、削減全体の約 10%に相当するとされている。

- 各機関の想定によると，1.5℃排出経路において、NETsの削減寄与の下限は，世界で2030年に1～1.6GtCO_2，2050年に5～7GtCO_2，削減全体の約10%に相当し、再エネ、省エネ、CCUSに次ぐインパクトを想定

2030年
NETsのCO_2削減寄与・ポテンシャルの推定, GtCO_2/年



2050年
NETsのCO_2削減寄与・ポテンシャルの推定, GtCO_2/年



* IEAはDACCSとBECCSのみが対象

出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG発表資料,以下を元にNEDO-TSCにて作成, (2022)
IEA:Net Zero by 2050,　NGFS:Network for Greening the Financial System, https://www.ngfs.net/en/publications/ngfs-climate-scenarios　McKinsey: https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/climate-math-what-a-1-point-5-degree-pathway-would-take　Potential:Coalition for Negative Emission, https://coalitionfornegativeemissions.org/the-case-for-negative-emissions-executive-summary/

図 2.3.5-6　ネガティブエミッション技術のポテンシャル評価 [11]

（出典：経済産業省，2022）

NETs に関する国内外の政策動向について、図 2.3.5-7（国別）および図 2.3.5-8（政策別）に示した。

図 2.3.5-7 を見ると、日本では CCUS を 2025 年までに社会実装することを筆頭に、グリーン成長戦略において高効率な CO_2 分離回収技術の開発、革新的環境イノベーション戦略で DAC 技術の追求を明記している。アメリカでは、DACCS/BECCS/海藻類炭素固定を国家プロジェクトとして推進し、インフラ投資法案で DACS/CCUS 関連の地域別ハブの建設や検査、標準化を対象に含めた出資を進めている。中国では風化促進を含む CCUS や海洋におけるネガティブエミッションを推進しており、EU や英国でも同様に NETs 関連プロジェクトを実施しており、大規模に展開する現実的な可能性を評価し、地球への影響、許容性、実現可能性についての評価を提供しながら、ネガティブエミッションの地域的、世界的拡大の可能性評価と潜在的な環境、経済、社会のコベネフィットとトレードオフのマッピング等を実施している。

NETsに関する国内外の政策動向（１）

国	概要
日本	● CCUSを2025年までに社会実装することを目指し、大規模な実証試験事業や貯留適地の調査事業を実施。**2019年に目標である30万トンの圧入に成功。** ● グリーン成長戦略（2021年6月）において高効率なCO2分離回収技術を開発する旨を明記。 ● 革新的環境イノベーション戦略(2020年1月)において、DAC技術を追求する旨を明記。
米国	● 既存の石炭やフラッキング産業を新エネルギー化推進と共に転換を図る狙い。採掘跡のCCS転用と化石燃料の将来の有効活用に重点化、**DACCS/BECCS/海藻類炭素固定を国のプロジェクトとして推進** ● インフラ投資法案（2021年11月）において、**DACS/CCUS**関連の地域別ハブの建設や検査、標準化を対象に含め出資。 ● **DACCS**への基金として合計4,400万ドル（48.4億円）。**DACCSとCCUSの混合**プロジェクトや**BECCSとCCUS混合**プロジェクトを実施。**海藻・海草類等による炭素固定化**のための基金設立も。
中国	● 中央政府による強力な政策推進に加え、海洋沿岸の省でも独自に計画を策定。**風化促進を含むCCUSや海洋におけるネガティブエミッションを推進。** ● 中国政府は2016年よりブルーカーボンのプロジェクトを開始。2020年には5ヶ年計画を策定。**貝や海藻類による炭素固定プロジェクト**を推進。沿岸の山東省威海市でも2021年に「2021-2025年ブルーカーボン発展行動計画」を発表。 ● 第13次5ヵ年科学技術発展計画（2016年-）において、**CO_2鉱物化（風化促進）を含む、CCUS技術**のイノベーション推進。また第14次5ヵ年計画(2022年-)では、**森林被覆率増加**の目標も。 ● 中国国家自然科学基金等の支援により、**海洋のアルカリ化**、環境改善、炭素吸収量増加を実証する研究も実施。
EU	● HORIZON2020（2014～2020）において、NETs関連プロジェクトを実施。 ● Quantifying and Deploying Responsible Negative Emissionsプロジェクト：ネガティブエミッションとその実践について、技術、環境、社会、経済の側面より**横断的かつ統合的な分析を行い**、大規模に展開する**現実的な可能性を評価、地球への影響、許容性、実現可能性についての評価を提供。** ● Land-Use Based Mitigation for Resilient Climate Pathwaysプロジェクト：農業、林業、およびその他の土地利用セクターにおける、陸上ベースのネガティブエミッションのソリューションの気候への影響を推定。**ネガティブエミッションの地域的、世界的拡大の可能性を評価、潜在的な環境、経済、社会のコベネフィットとトレードオフのマッピング**を実施。 ● Ocean-based technologies to remove carbon dioxideプロジェクト：**海洋ベースのネガティブエミッションの実現可能性と影響の調査**を実施。
英国	● 英国ビジネスエネルギー・産業戦略省による英国の気候変動目標達成と6万件の雇用創出に向けた1億6,600万ポンド（約260億円）の大規模助成プログラム（2021年12月）。**DACCS、BECCS、海洋アルカリ化**(※1)、**CO_2鉱物化（風化促進）**（※2)を含むPhase-1に進む24のプロジェクトを選定。

出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WGでのNEDO発表資料及び第７回グリーンイノベーション戦略推進会議WGでのJST発表資料をもとに経産省作成。 26

図 2.3.5-7　NETs に関する国内外の政策動向（国別）[11]（出典：経済産業省，2022）

図 2.3.5-8 に示した政策別の動向を比較すると、ルールメイキング、税制優遇・補助金等、および初期需要創出の観点から各国でネガティブエミッション技術に関する政策が提示されている。アメリカではインフラ投資法案で DACS/CCUS 関連の地域別ハブ建設や検査・標準化、中国ではブルーカーボン吸収源の基準化の推進、EU では Sustainable Carbon Cycles に基づいて炭素削減に向けた認証制度の設計を提案している。日本でも、グリーン成長戦略に基づいて CO_2 分離回収の標準評価技術を確立し、技術の国内外への展開を加速するため国際標準化についての検討も明記している。

NETsに関する国内外の政策動向（２）

種類	概要
ルールメイキング	● 米国：インフラ投資法案（2021年11月） **DACS/CCUS関連**の地域別ハブの建設や検査に加え、**標準化**も対象として含まれている。 ● 中国：沿岸地域での事例（福建省廈門（アモイ）市） ブルーカーボン取引サービスプラットフォームを立ち上げ、漁業を含む**ブルーカーボン吸収源の基準**を推進 日本：**グリーン成長戦略**（令和3年6月） **CO_2分離回収の標準評価技術を確立**し、日本の技術の国内外への展開を加速するため、**国際標準化について検討する旨を明記。** ● EU：「SustainableCarbonCycles」（2021年12月発表） 欧州グリーン・ディールのFarmtoFork戦略実行のための戦略文書。**炭素削減に向けた認証制度の設計**の提案も。CO_2の土壌貯留等を促進するための方向性を提示
税制優遇・補助金等	● 米国：連邦45Q優遇税制、カリフォルニア州のLCFS（LowCarbonFuelStandard）制度 連邦45Q優遇税制は、**CCSに対する連邦税制優遇制度**（2018年施行）、カリフォルニア州のLCFS（LowCarbonFuelStandard）制度は、低炭素燃料の利用や**炭素回収のプロジェクトに対しクレジット**を付与し、クレジッをは市場で取引する制度（2011年施行）等。これらの制度により、**DACを進める企業に対する公的なサポート**が整備されつつある。またDACプラントの立ち上げ計画などの動きも。 ● EU：「SustainableCarbonCycles」（2021年12月発表） **CO_2の土壌貯留を促進**のための方向性を提示（**技術開発のための助成金**、EU域内のCCUS市場構築、**financialincentiveの提案**等）。 ● 日本：ムーンショット型研究開発事業 DACに加えBECCSや風化促進、ブルーカーボンの研究開発を支援。R3年度補正予算案においては**40億円を措置** ● 英国：**DACCS技術導入への補助金** ● 仏電気大手EDFが率いるコンソーシアムが英国サイズウェルC原子力発電所でのDACCS技術導入に対し、**政府により補助金**（25万ポンド（約4,000万円））|
初期需要創出	● **FirstMoversCoalition**（2021年11月にCOP26において、米国ケリー特使と世界経済フォーラムにより発表された、2050年までに**ネット・ゼロを達成するために必要な重要技術の早期市場創出に向け立ち上げた世界の主要グローバル企業によるイニシアチブ**）参加事業者は、開発初期、実証、試作段階の新たな低炭素技術に対する新たな市場需要を創出するため、現時点では2030年までにそうした技術により提供される**ゼロエミッションの製品やサービスを購入することをコミット**。まず、鉄鋼、海運等のセクターで開始され、**今後化学品、DAC等も対象となる予定。**

出典：第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WGでのNEDO発表資料をもとに経産省作成。 27

図 2.3.5-8　NETs に関する国内外の政策動向（政策別）[11)]（出典：経済産業省，2022）

2.4　海外における CR 関連政策及び国際的枠組みの動向

海外においては、ネガティブエミッション技術（NETs）を含む CDR（Carbon Dioxide Removal）の政策が導入されてきており、その中にカーボンリサイクル（CR）に関連する政策が包含されている。

図 2.4-1 に、CDR に関するミッションイノベーションの国際連携の概要を示した。CDR は世界的な共通課題であることから、22 か国＋EU が参加して、脱炭素化に向けた研究開発の国際連携を進めるミッションイノベーション（MI）において、有志国によって CDR ミッションが立ち上げられた。今後、DAC、BiCRS、Mineralization、及び LCA/TEAs（Life Cycle assessments/ Technoeconomic Analysis）の 4 つの技術分科会で、ロードマップ策定等の作業を進める予定である。日本は、LCA/TEAs 分科会の共同リーダーとして立候補し、他の 3 つの分科会でも参加を表明している。MI の CDR ミッションでは、各技術分科会の会合を開催しながらイノベーションロードマップを策定し、さらに各技術分科会のアクションプランを検討中で、日本の主催で 2023 年 3 月にワークショップを開催する予定である。経産省や産総研の研究者の他、海外の DAC 技術開発ベンチャーや関連企業、アカデミア等の講演者を調整している。

また、NEDO が主催する ICEF2021 でも、ネガティブエミッション技術（NETs）をテーマとして取り上げ、国内外の有識者が議論して、研究開発動向の報告書を公表している。

- 二酸化炭素削減技術は、世界的な共通課題。各国の技術をもちより、開発していくことが重要。
- 22カ国+EUが参加し、脱炭素化に向けた研究開発の国際連携を進める「ミッション・イノベーション（Mission Innovation）」では、有志国によりCDR（二酸化炭素除去技術 Carbon Dioxide Removal）ミッションを立ち上げ。今後、4つの技術分科会で、ロードマップ策定等の作業を進める。日本は、LCA/TEA s 分科会の共同リーダーに立候補。他の３つにも参加を表明。

- DAC（Direct air capture）、
- BiCRS（Biomass with Carbon Removal and Storage）
- Mineralization（Enhanced mineralization）
- LCA/TEAs（Life Cycle Assessments /Technoeconomic Analysis）

- MIのCDRミッションでは、２月中に各技術分科会の初回会合を開催。3月末までにイノベーションロードマップを、さらに9月までにアクションプランを策定予定。このほか、日本の主催により、CDR技術のLCAをテーマにしたオンラインWSを3月中旬に開催予定。産総研の研究者の他、海外のDACの技術開発ベンチャーや関連企業、アカデミア等の登壇を調整中。
- ICEF2021でもNETsをテーマとして取り上げ、国内外の有識者が議論。研究開発動向の報告書を公表。

Member	Notes
Australia	• Supporting member
Canada	• Co-lead • Primary interests: DAC, LCA/TEAs • Potentially interested in BiCRS, Min.
EC	• Supporting member • Interests: TBC
India	• Supporting member • Interested in contributing to discussions on DAC, BiCRS, Min., LCA/TEAs
Japan	• Supporting member • Primary interest: LCA/TEAs. • Interested in contributing to discussions on DAC, BiCRS, Min.
Norway	• Core member • Primary interests: DAC, LCA/TEA • Some interest in BiCRS (around post-conversion paths)
Saudi Arabia	• Co-lead • Primarily interested in Mineralization and LCA/TEA.
US	• Co-lead • Interest in all topics.

図 2.4-1　CDR に関するミッションイノベーションの国際連携の概要 [11)]

（出典：経済産業省，2022）

図 2.4-2 には、アメリカ DOE が発表した CO_2 利活用が期待できる分野とポテンシャルを示した。骨材およびコンクリートのマーケットサイズは、各々36 億トン、14 億トンと見積もられている。

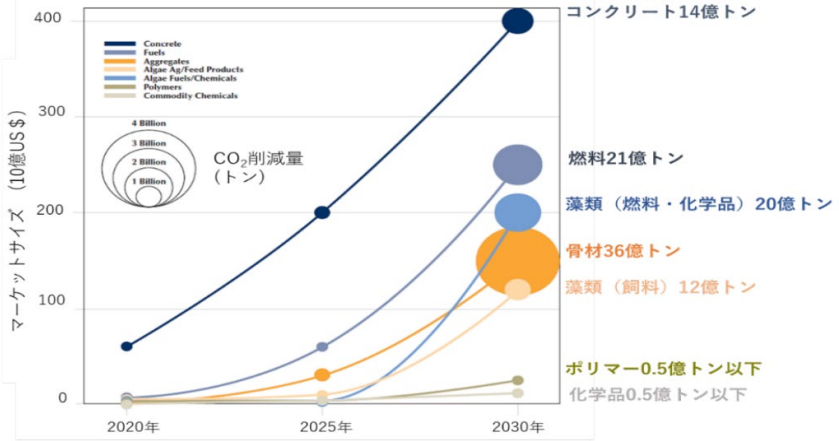


図 6. CO_2 利活用が期待できる分野
出典：米国 DOE 15th Carbon Dioxide Utilization Summit(2020)発表資料より作成

図 2.4-2　米国 DOE が発表した CO2 利活用が期待できる分野とポテンシャル [14)]
（出典：カーボンリサイクルファンド，2021）

図 2.4-3 に、アメリカの CCUS に対する税額控除の概要を示した [15)]。アメリカ内国歳入法の中で、CO_2 隔離の税額控除（セクション 45Q）が規定され、2008 年に発効した。EOR 以外のインセンティブを強化し、2018 年の改正によって、控除額の拡大と共に、適用範囲を拡大（適用対象の年間貯留量下限を縮小。トータル貯留量を変更し、より長期の支援）している。

アメリカのCCUSに対する税額控除（45Q）

CCUSに対する税額控除
・内国歳入法（Internal Revenue Code）のセクション45Q（CO2の隔離の税額控除）に規定され、2008年に発行
・貯留に特化した税額控除により、EOR以外のインセンティブを強化

45Qの2018年改正概要
・控除税額の拡大
・控除適用の資格基準を引き下げ（規模の小さいプロジェクトへの適用拡大へ）
・控除適用はトータル量の上限設定から最長12年間に変更（より長期の支援へ）

項　目		改正前	改正後
税額控除	EOR及びその他のCO2産業利用	$ 10/t-CO_2 ＋ 物価補正分	$ 12.83/t-CO^2～$ 35/t-CO^2 ＋ 物価補正分 （2026年まで直線的に増加、その後は物価補正）
	CO2貯留	$ 20/t-CO_2 ＋ 物価補正分	$ 22.66/t-CO^2～$ 350/t-CO^2 ＋ 物価補正分 （2026年まで直線的に増加、その後は物価補正）
控除適用の資格基準		年間50万t以上	年間10万t以上
控除適用の制限		トータル7,500万t-CO_2が上限	上限値は撤廃 運用開始から12年間継続

図 2.4-3　アメリカの CCUS に対する税額控除の概要

図 2.4-4 に、エネルギー安全保障強化・CN 実現に向けたクリーンエネルギー分野での日米協力を示した。昨年の日米競争力・強靭化パートナーシップ等に基づいて、今年 5 月にエネルギー安全保障の強化とカーボンニュートラル実現の両立に向けたクリーンエネルギー・トランジションの加速のための議論の場として、日米クリーンエネルギー・エネルギーセキュリティ・イニシアティブ（CEESI）の立ち上げに合意した。

イノベーションと社会実装の加速化に向けた日米協力を推進するため、エネルギー安全保障及びクリーンエネルギー・トランジションに関する横断的な議論を行う全体会合の下に、個別分野ごとのタスクフォース（TF）として、TF1：技術の市場化、市場統合、TF2：産業の脱炭素化、TF3：CCUS/カーボンリサイクル、TF4：省エネ、ディマンドレスポンス、TF5：再生可能エネルギー技術、グリッド統合、TF6：水素、燃料アンモニア、TF7：原子力、TF8：蓄電池、持続可能な交通、ゼロエミッション車、が設置されている。

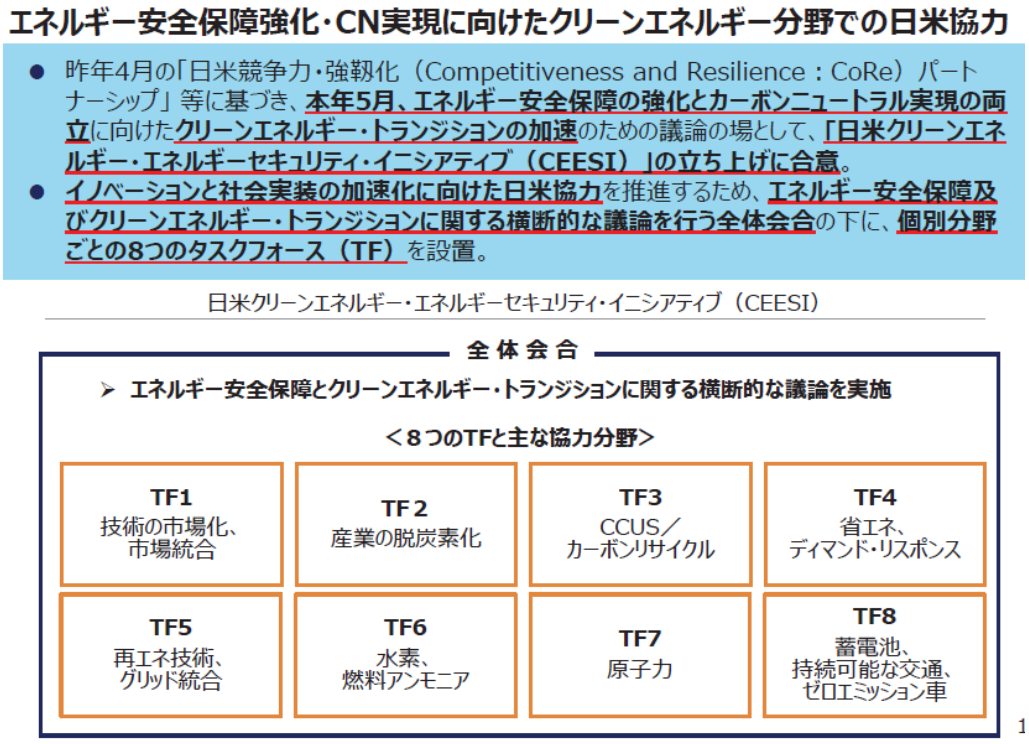


図 2.4-4　エネルギー安全保障強化・CN 実現に向けたクリーンエネルギー分野での日米協力 [10)]
（出典：経済産業省，2022）

図 2.4-5 に、欧州の 2030 年に向けた CCUS ロードマップを示した [16)]。CCUS SET-Plan（European Strategic Energy Technology Plan）と略称されるロードマップが提示されている。

CCUS SET-Plan

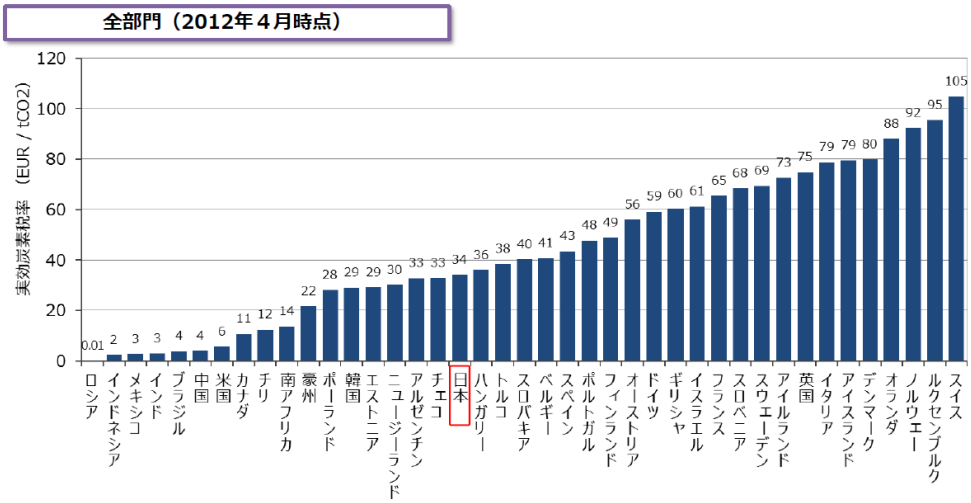
「SET-Plan」はEuropean Strategic Energy Technology Planの略語。国際協力により低炭素技術の普及、新技術の開発、コスト低減の促進を目的とした計画。欧州11カ国、EU委員会及び各種ステークホルダーが参加。ノルウェー・オランダ・Zero-Emissions-Platform（EU委員会の諮問組織）が取りまとめを実施。

1	産業用 CO2 発生源とリンクした 商用規模の15 件の CCS プロジェクトを実施。 さらに、 10 件のプロジェクトは基本設計を 終了、5 件は投資決定を実施。
2	エネルギーミックスにおいて再エネ電源の増加に対応するクリーンかつ調整力のある電力・熱供給プラント（廃棄物利用プラントを含む）についての10件の商用規模のCCSプロジェクトを実施。
3	EU 加盟国および SET-Plan参加国は、CO2 発生源のクラスターや国境を越えた共有の CO2 インフラを含む、 CO2 輸送インフラ（新規、改修、再利用）の開発のための国及び地域の CCS ロードマップを設定（このインフラには欧州 10 年間ネットワーク開発計画 (TYNDP) に含む）。
4	中央・東・南ヨーロッパに焦点を当てた、CO2 輸送インフラに関する EU 共通利益プロジェクト (PCI) を少なくとも 10 件は追加（最初の本格的な CCS プロジェクトの経験を目標 3 及び4 に関連する SET-Plan 活動に考慮する）。
5	欧州の各国当局が承認した、適性及び経済性に優れた貯留地（貯留容量）のアップデートと詳細なインベントリの作成。
6	異なる産業部門における技術成熟度（TRL）7-8を持つCO2回収技術について、少なくとも3件のパイロットプロジェクトを実施（低排出を可能にする水素製造プロジェクトを 1 件含む）。また、TRL 5-6を持つ回収技術の少なくとも 6 件のパイロットプロジェクトを実施（うち2件は少なくともバイオCCSやDACのようなネガティブエミッション技術を試験）。
7	中間目標は、異なる環境にある準備中または運営中（貯留許可の申請準備段階または許可済）の新たな CO2 貯留サイトを少なくとも 6 箇所確保すること。 また、2030年までの目標は、陸域・海域の両方において異なる地質構成を持つさらに9箇所の貯留サイトを同じレベルまで評価すること。
8	2030年までに、CO2を原料とした燃料・化学物質・材料を生産する複数の実証プロジェクトを年間数十キロトンの規模で実施（EU の 2030 年と 2050 年の気候変動対策に関する目標達成に貢献）。
9	2030年までに、最初の大規模な商用CCUプロジェクトを実施（国及びEUレベルでの支援の法的枠組みやリスク分散する財務措置により可能となる）。
10	すべての欧州諸国は、可能な限り、2050年までのネットゼロへの移行に向けた自国の戦略の中でCCS及びCCUの必要性を位置付ける。

図 2.4-5　欧州の 2030 年に向けた CCUS ロードマップ

図 2.4-6 に、OECD による国内外の実効炭素価格を示した [17]。この実効炭素価格は、全部門の排出枠価格、炭素税、エネルギー税の合計になっている。日本は、実効炭素価格が 34 EUR/t-CO_2 となっており、ヨーロッパ諸国に比べると、非常に低くなっており、今後日本でも適正なカーボンプライシングのあり方に関する真剣な議論が望まれるところである。

➢ **OECDによれば、日本及び諸外国の実効炭素価格（排出枠価格、炭素税、エネルギー税の合計）（全部門）は以下のとおり。**



（注）個別の減免措置を加味するため、各国の部門別の実効炭素価格（炭素税・エネルギー税の税率の合計及び排出量取引制度の排出枠価格）を、部門別のエネルギー起源CO_2排出量で加重平均をとって算出。2012年10月から導入されている温対税（289円/tCO2）は含まれていない。「Effective Carbon Rates」ではバイオマスの排出量が計上されており、排出量と課税額にそれぞれバイオマス起源排出への課税が含まれる。
（出所）OECD（2016）「Effective Carbon Rates」より環境省作成。

図 2.4-6　OECD による国内外の実効炭素価格 [17]（環境省，2018）

参考文献

1) 環境省（2022）：気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 6 次評価報告書（AR6）第 2 作業部会（WG2）報告書 参考資料

2) 環境省（2022）：令和 3 年度関東地域エネルギー・温暖化対策推進会議，資料 2-1）地球温暖化対策の最近の動向について

3) 経済産業省（2021）：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第 43 回会合），資料 2）2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）

4) 経済産業省（2021）：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第 43 回会合），資料 1）2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた検討

5) 経済産業省（2020）：第 3 回グリーンイノベーション戦略推進会議，資料 3-4）脱炭素社会に向けた対策の考え方

6) 経済産業省（2023）：カーボンリサイクルロードマップ改訂版（2023.6）

7) 経済産業省（2021）：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

8) NEDO ホームページ：カーボンリサイクル実証研究拠点，
https://osakikamijima-carbon-recycling.nedo.go.jp（2023/9 アクセス）

9) 経済産業省（2022）：「クリーンエネルギー戦略」に関する有識者懇談会（2022 年 5 月 19 日開催），資料 2）クリーンエネルギー戦略 中間整理（概要）

10) 経済産業省（2022）：クリーンエネルギー戦略（中間整理）

11) 経済産業省（2022）：第 8 回グリーンイノベーション戦略推進会議，資料 4）ネガティブエミッション技術について

12) ICEF2020：Biomass Carbon Removal and Storage（BiCRS）Roadmap

13) 環境省（2015）：IPCC 第 5 次評価報告書の概要 第 3 作業部会(気候変動緩和)

14) 一般社団法人カーボンリサイクルファンド（2021）：2050 年カーボンニュートラルに向けた提言

15) Bellona（2018）：Will changes to the US Budget Act of 2018 incentivise CCS in the US?

16) Netherlands, Norway, and the Zero Emissions Platform（2021）：CCUS SET-Plan CCUS Road Map to 2030

17) 環境省（2018）：中央環境審議会 地球環境部会 カーボンプライシングの活用に関する小委員会（第 4 回），資料 2）カーボンプライシングの意義・効果及び課題等

第 3 章　CR に係る土木技術等

3.1　CR 技術領域

3.1.1　CR 技術の分類

土木技術分野において、カーボンリサイクルを考える場合、以下の項目によって考え方が異なってくる。

（１）想定される CO_2 の捕捉方法

a)希薄な大気中の CO_2：DAC（Direct Air Capture）

b)濃厚な排ガスの CO_2：Carbon Capture（CC）

（２）CO_2 貯留・活用の方法

a)単なる貯留：Storage（S）

貯留装置として CO_2 の出し入れ管理を続けるだけの存在

b)貯留を兼ねた活用：Utilization and Storage（US）

構造体や部材として別サービスを提供できる機能を有している存在

（３）CO_2 貯留・活用された CO_2 のその後の行方

a)再び CO_2 になって、あらためて回収されることが期待される

（CO_2 からの合成樹脂やバイオエタノールなど）

b)長く貯留以外の機能として使われながら CO_2 はそこに固定され続ける

（セメント、コンクリートなど人工鉱物、土壌など天然鉱物、植物（木材、藻類））

このうち、建設系に多くかかわってくるものは、（１）の a)DAC と b)CC の両方、（２）US、（３）b)の場合がほとんどであると考えられる。これは、一般的には DACCUS（Direct Air Capture and Carbon Utilization and Storage。C が一個多いが論文などではこの用い方が多い）か CCUS と呼ばれるものである。次項 3.2 ではこの領域を中心に解説を行う。

3.1.2　土木技術の位置づけ

次項 3.2 で紹介している技術のほとんどが、CCUS 技術であり、DACCUS は CCC と DAC コートのみである。国内外によらずセメント、コンクリートなどの人工鉱物を用いて、DACCUS を謳っているものはそう多くはない。それはセメント・コンクリート系でよく用いられる人工鉱物の CO_2 固定には、水に溶けた炭酸イオン、重炭酸イオンが必要で、大気中の希薄な CO_2 と溶解平衡になる水中の炭酸イオン濃度、重炭酸イオン濃度が極めて低いため、工業的なプロセスで炭酸化を促進させるためにはどうしても濃厚な CO_2 を用いることが求められているからである。よって、国内のみならず全世界的に DACCUS の検討が十分ではないのが現状である。人工鉱物を用いる場合には、原理的に、圧倒的に DAC より CC の方が炭素固定速度が速いと考えられている。一方で、CC を実施するためには必ず濃厚な CO_2 を調達する必要がある。例えば化石エネルギーや化石資源を消費する製品工場や火力発電所などでは濃厚な CO_2 が必ず排出されるので、この近傍であれば CC を最も効率よく稼働させることができる。しかし、CO_2 を固定したあとに、構造体や部材などのように貯留以外の別のサービスで活用する「US」を行うとなると、固定した後の製品を運搬しなければならない。通常、化石資源を用いて人工的な加工製品を 1 トン製造すると、1～2 トン程度の CO_2 が排出される。そして、1 トンの製品を 1 ㎞陸送すると、0.1～0.2 ㎏程度の CO_2 の排出量が加算される。ここで、CCUS 技術によって、カーボンニュートラルではないにせよ、従来の製品よりも 1 トンあたり 0.01 トンの CO_2 削減が実現したとする。ただし、この CO_2 削減量は、CCUS のプロセスにかかる消費エネルギーなどを差し引いた、ネット CO_2 削減量であるとする。ここから、CCUS が出荷され、例えば陸送によって排出される CO_2 によってネット CO_2 削減量がどんどん目減りしていくことになるため、この CCUS の最長陸送可能距離は 100 ㎞程度となる。もし全国に流通させるとなると、輸送による CO_2 が固定量を超過してしまう地域が多数存在するため、この CCUS を導入しなかった方がよい状況が存在してしまう。もし、CCUS を実現しながら、かつ日本全国に流通させたうえで、それでも確実に CO_2 削減を実現するためには、CCUS の輸送を除くネット CO_2 削減量（従来同一機能品のネット CO_2 排出量に比較したときの削減量）が CCUS1 トンあたり、最低でも 0.1 トン、望ましくは 0.2 トン程度は必要であろう。（CCUS の輸送を除くネット CO_2 削減量が 0.1 トンだと陸送最長距離が 1,000 ㎞あり、十分 CO_2 削減をしながら流通させられそうに見えるが、CO_2 削減量としては少なすぎると思われる）

製品の出荷輸送を除くネット CO_2 削減量が製品 1 トンあたりどの程度なのか、ということが今後しばらくは実務ベースで評価軸になっていくものと考えられる。

ただし、LCA 分野における本来の評価方法では、「製品の出荷輸送を除く従来同一機能品の CO_2 排出量と比較したネット CO_2 削減量」という考え方ではなく、「その製品の製造や処理にかかる CO_2 排出量と、固定された CO_2 量を比較した『同一製品内でのネット CO_2 固定量』」で評価し、これを±ゼロ、もしくはマイナスにすることで、カーボンニュートラルもしくはカーボンネガティブかどうかを評価をするものである点には留意されたい。

土木分野における CR 技術において、前者のような評価方法が一般的なのは、セメント・コンクリート系のような人工鉱物の多くが CO_2 を固定することで、強度や耐久性を担うカルシウムシリケートやカルシウムアルミネートが消費されるため、US の Utilization と Storage を両立するために、かなりの技術的ブレイクスルーが求められているためである。カーボンニュートラル、カーボンネガティブを実現する可能性がある技術は徐々に萌芽しつつある過渡期のいま、「まずは少しでも削減できる CCUS 製品を世に出していく」という考え方に立ち、当面の努力を鼓舞しつづける意味で、「製品の出荷輸送をのぞく従来同一機能品からのネット CO_2 削減量」についてもしばらくは評価するべきであると考えられる。

一方、DAC の場合には基本的に大気中の CO_2 を固定するものなので、CCUS に比べて CO_2 固定速度は圧倒的に遅くなる。しかし、どこでもできる上に、工場の生産状況によっては絶えず排出される濃厚 CO_2 を相手にしなくてよいので、技術が単純であれば DACCUS を製品として利用する近傍で CO_2 固定を行える利点がある。ただし、製品の出荷輸送距離の制約は CCUS と同じであるため、DACCUS においても、製品の出荷輸送をのぞく従来同一機能品の CO_2 排出量と比較したときのネット CO_2 削減量が製品 1 トンあたり最低でも 0.1 トンのぞましくは 0.2 トンである必要があるだろう。これについては、例えば、既設コンクリート構造物を移動せず、そのまま活用して CO_2 固定を促進させる方法などの場合、輸送による CO_2 排出量は発生しないので、速度は遅いが有効に CO_2 固定量を評価できる可能性もある。こうした土木構造物ならではの新しい CCUS の在り方も今後検討する価値がある。既設コンクリート構造物の CO_2 固定促進については今後積極的に検討、発信していく必要があると思われる。

3.2　コンクリート・セメント分野の技術

3.2.1　国内・海外の技術紹介

(1) CR に関する海外の動向

CR に関する海外の動きは、わが国同様多岐にわたる取り組みが進められている。しかしながら、鉱物系については必ずしも先進的とは言えない。令和 2 年に実施された独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の「海外カーボンリサイクル技術の実現可能性調査」では、CO_2 を利用した炭酸塩製造技術がクローズアップされており、その中で 8 件の技術が紹介されている（表 3.2.1-1）。

表 3.2.1-1　有望な炭酸塩製造技術候補の選定 [1)]（出典：JOGMEC, 2020）

評価項目	1. 発電所の排ガスがそのまま活用できる	2. 開発ステージ（技術の確立度）	3. 商用規模プラント設計の実現可能性	4. CO_2の削減量	5. 経済性	6. 市場性	評点
1. GreenOre	◎	○	◎	○	○	◎	12
2. O.C.O. Technology	○	◎	◎	○	○	◎	12
3. Blue Planet	◎	◎	○	△	△	△	7
4. Solidia	○	◎	◎	○	△	○	9
5. CarbonCure	○	◎	◎	△	○	○	9
6. Carbon Capture Machine	◎	△	○	△	△	△	4
7. Carbon Upcycling UCLA	◎	△	○	○	△	○	6
8. Mineral Carbonation	○	◎	○	△	△	○	6

＜配点：◎（優れている）＝3点、○（良い）＝1点、△（普通～劣る）＝0点＞

また、この調査では日本への導入可能性についてもシミュレーションされており、技術的に有望と評価された 2 件（Green Ore、O.C.O.Technology）に対し、以下の 6 つの項目について詳細調査を実施している。

①発電所等の排ガスがそのまま利用できるかどうか

②開発ステージ

③商用規模プラント設計の実現可能性

④CO_2 削減量

⑤経済性

⑥市場性

その結果、Green Ore が有望と評価したものの導入可能性については、CO_2 の固定化割合が低く、これを高める手法の確立が必要と定義付けている。

このような状況下、現時点でわが国に紹介されているのは、ブループラネット（Blue Planet）とカーボンキュア（CarbonCure）の 2 技術が挙げられる。

ブループラネットは、米国ブループラネット社（Blue Planet Systems Corporation 社）

が開発した技術であり、発電所などの排気ガスに含まれる CO_2 を廃棄コンクリートなどから分離・抽出したカルシウム成分と合成して得られる炭酸化カルシウム骨材を CO_2 活用骨材としてコンクリート製造時に投入することでコンクリートへ CO_2 を固定化する技術である。

一方、カーボンキュアは、カナダのカーボンキュア社（CarbonCure Technology 社）が開発した技術であり、コンクリートの製造時に液化 CO_2 を噴射して取り込み、ナノレベルの鉱物を生成させ、CO_2 の主要排出源の一つであるセメント量を削減しながらコンクリート強度を引き出す技術である。なお、この技術は三菱商事株式会社（以下、「三菱商事」）が、環境負荷低減への取り組みの一環として 2021 年 1 月に資本参加するとともに事業化に向けた協業契約を行っている。

三菱商事は、土木・建築の構造物に不可欠な素材であるコンクリートは、世界中に普及し市場規模が大きいことから、コンクリートへの CO_2 の有効利用分野に注力している。特に、他の脱炭素技術と比べても社会実装が早いと目されている炭酸化反応に着目し、ブループラネット（Blue Planet）、カーボンキュア（CarbonCure）、O.C.O Technology を推進している。

(2) CR に関する国内の動向

CR に関する国内の動向としては、前述した技術の他に直接 CO_2 を吸収する技術とは異なり、排出量の原単位が最も高いセメントの量を一部、あるいは全てをフライアッシュや高炉スラグ微粉末と置き換えることで、結果的に CO_2 の低減に資する技術の開発が進んでいるといえる。

2021 年のコンクリート工学誌 9 月号には、「カーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術」の特集が掲載されている [2)]。掲載事項は、副産物の積極利用、リサイクル、CO_2 の固定化の 3 つのカテゴリーで整理されており、本報告書もこの冊子を参考に取りまとめることとした。合わせて現在、わが国で吸収系の技術および本分科会第 3 回（2021 年 11 月 15 日）で「カーボンニュートラルに係るコンクリート技術等について」として紹介された技術、また、当日個別に紹介された技術等も参考にすることとした。それぞれの資料から以下の技術を抽出した。

【カーボンニュートラルに係るコンクリート技術等について】

① ブループラネット：ブループラネット社、三菱商事
② カーボンキュア：カーボンキュア社、三菱商事
③ 低炭素コンクリート：大林組
④ ECM（エネルギーCO_2 ミニマム）コンクリート：竹中工務店、鹿島建設
⑤ サスティンクリート（ゼロセメントコンクリート）：三井住友建設
⑥ ジオポリマー：大分高専、山口大学、鉄道総研、西松建設
⑦ 環境配慮（カーボンリサイクル、CO_2 削減指向）コンクリート：大成建設

【CR 分科会資料】

① CO_2-SUICOM：中国電力、鹿島建設

② CO_2-TriCOM：中国電力

③ C^4S 研究開発プロジェクト：東京大学他

また、一般社団法人日本建設業連合会　電力・エネルギー工事委員会　技術部会で実施したヒアリングによれば、上記技術の他に以下の技術が該当するものと判断した。

【一般社団法人日本建設業連合会　電力・エネルギー工事委員会　技術部会ヒアリングより】

① スーパーグリーンコンクリート：前田建設工業

② アッシュクリート：安藤・間

③ DAC コート：清水建設

④ バイオ炭コンクリート：清水建設

⑤ クリーンクリート：大林組

ヒアリングの時点では、前述した技術のほかに該当する技術は上記の 5 技術程度であったが、全世界的にカーボンニュートラルの動きが活発化してきたこともあり、建設業界においても技術開発に拍車がかかったようで、2023 年度に入り複数の会社から新しい技術の提示があった。

したがって、追加になった技術は、以下のとおり 8 技術となった。

① T-Carbon Mixing：大成建設

② O.C.O.Technology　：神鋼環境ソリューション・三菱商事

③ クリーンクリート N：大林組

④ リグニンクリート：大林組

⑤ ポリマークリート：大林組

⑥ LHC（ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート）：安藤・間

⑦ BBFA 高強度コンクリート：安藤・間

⑧ スラグリート：戸田建設

なお、前述の技術については、開発段階の進捗状況で名称が確定していなかった技術もあり、それらを精査し、本報告書の対象となる技術を以下の 26 技術とした。

① ブループランネット：ブループラネット社、三菱商事

② カーボンキュア：カーボンキュア社、三菱商事

③ O.C.O.Technology　：神鋼環境ソリューション・三菱商事

④　強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート：東京電力 HD

⑤　ECM（エネルギーCO2 ミニマム）コンクリート：鹿島建設

⑥　サスティンクリート（ゼロセメントコンクリート）：三井住友建設

⑦　ジオポリマー：西松建設

⑧　AAM コンクリート：西松建設

⑨　T-*e*Concrete/ Carbon Recycle：大成建設

⑩　T-*e*Concrete/ セメント・ゼロ型：大成建設

⑪　T-*e*Concrete/フライアッシュ活用型：大成建設

⑫　T-*e*Concrete/建築基準法対応型：大成建設

⑬　T-Carbon Mixing：大成建設

⑭　CO_2-SUICOM：鹿島建設

⑮　CO_2-TriCOM：中国電力

⑯　C^4S 研究開発プロジェクト：東京大学他

⑰　スーパーグリーンコンクリート：前田建設工業

⑱　アッシュクリート：安藤・間

⑲　LHC（ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート）：安藤・間

⑳　BBFA 高強度コンクリート：安藤・間

㉑　DAC コート：清水建設

㉒　バイオ炭コンクリート：清水建設

㉓　クリーンクリート：大林組

㉔　クリーンクリート N：大林組

㉕　リグニンクリート：大林組

㉖　ポリマークリート：大林組

㉗　スラグリート：戸田建設

しかしながら、これらの技術はただ単に「CO_2を吸収・利用する技術」と「CO_2を低減する技術」に振り分けられるものではなく、技術のコンセプトの違い、コンクリートの構成要素や製造過程、あるいは性状などに様々な違いがあり一括りにすることはできない。

そこで、技術シートに取りまとめる前にそれぞれの特徴から「CO_2を吸収・利用する技術」と「CO_2を低減する技術」をさらに細分化し、それぞれ図 3.2.1-1 及び図 3.2.1-2 に示す 3～4 のグループに分類することとした。

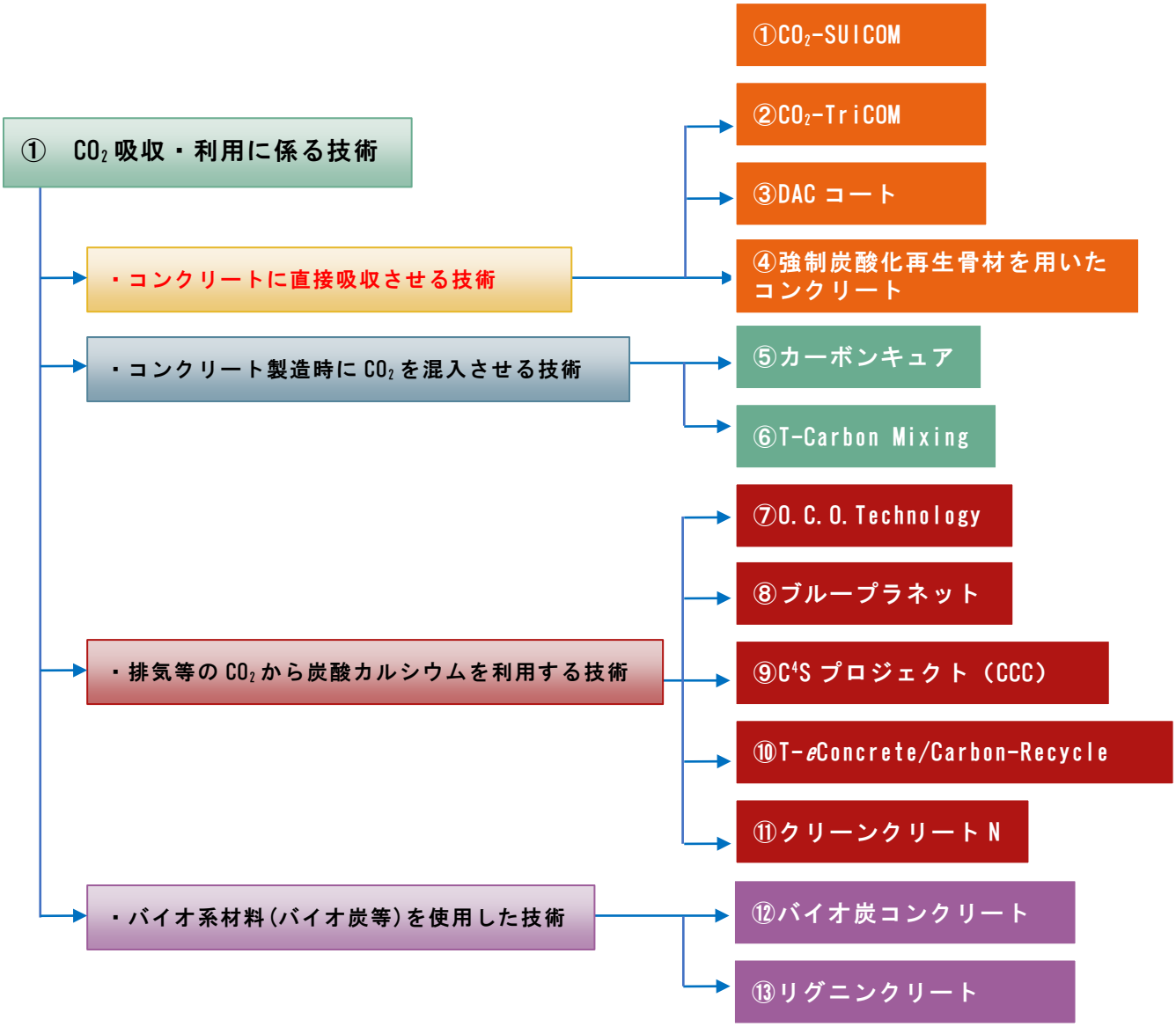


図 3.2.1-1　CO_2を吸収・利用する技術

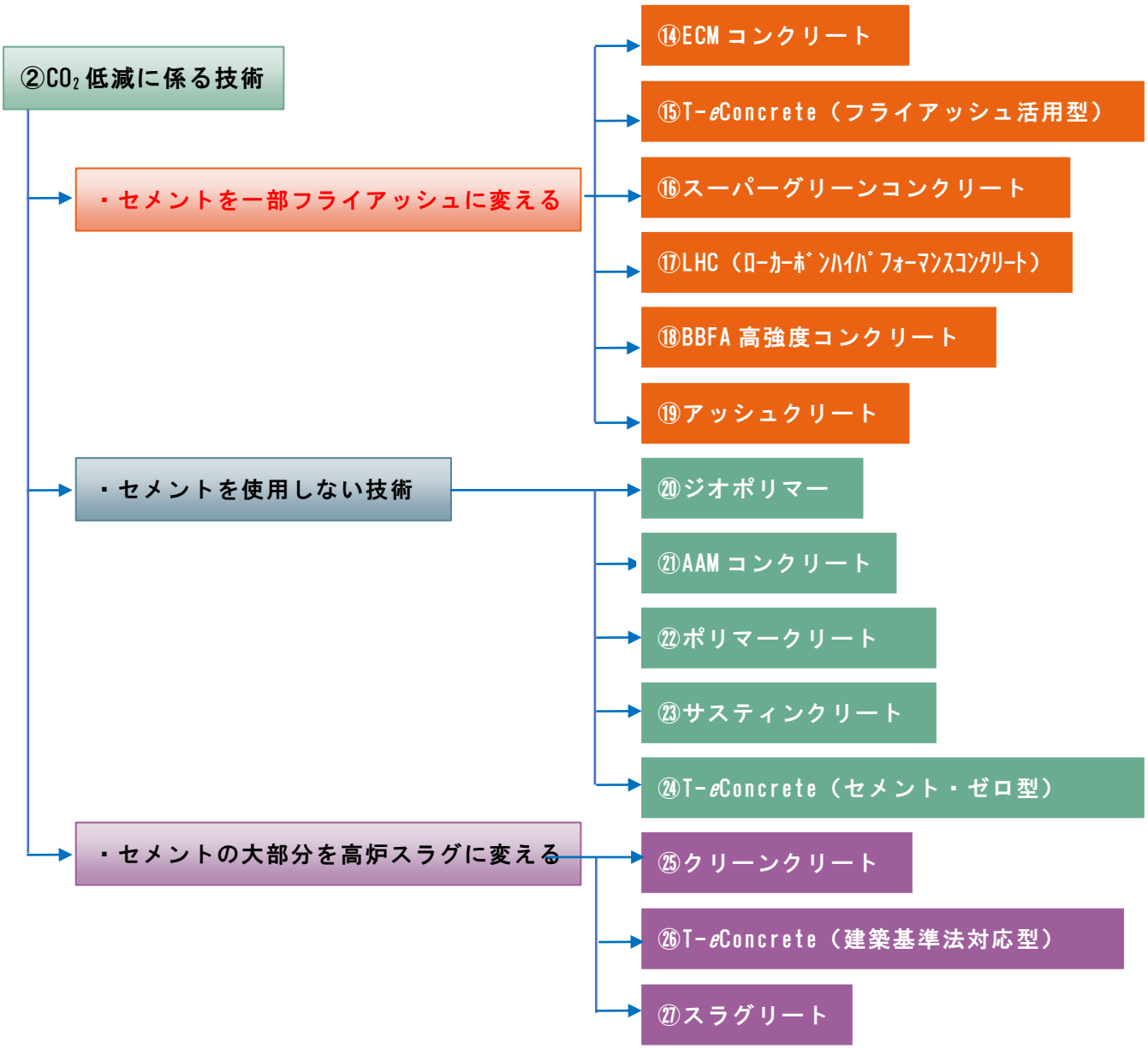
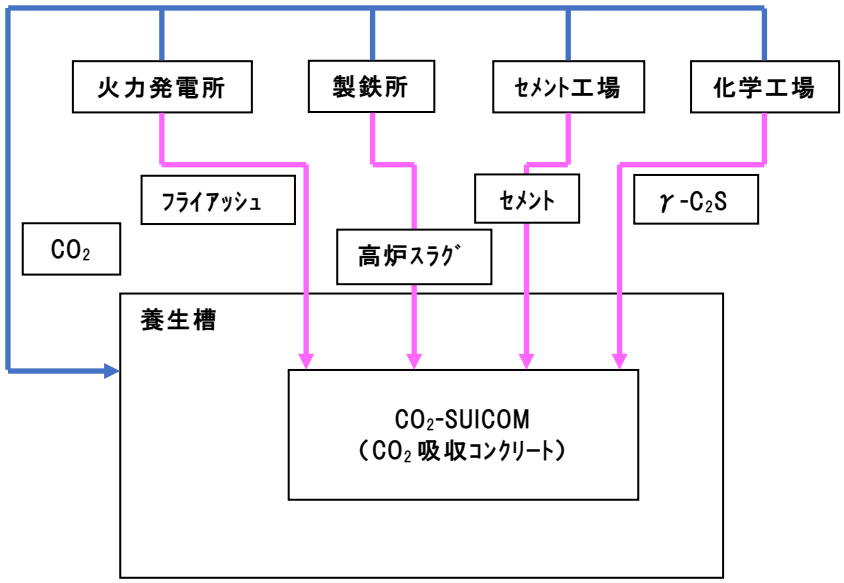


図 3.2.1-2　CO_2を低減する技術

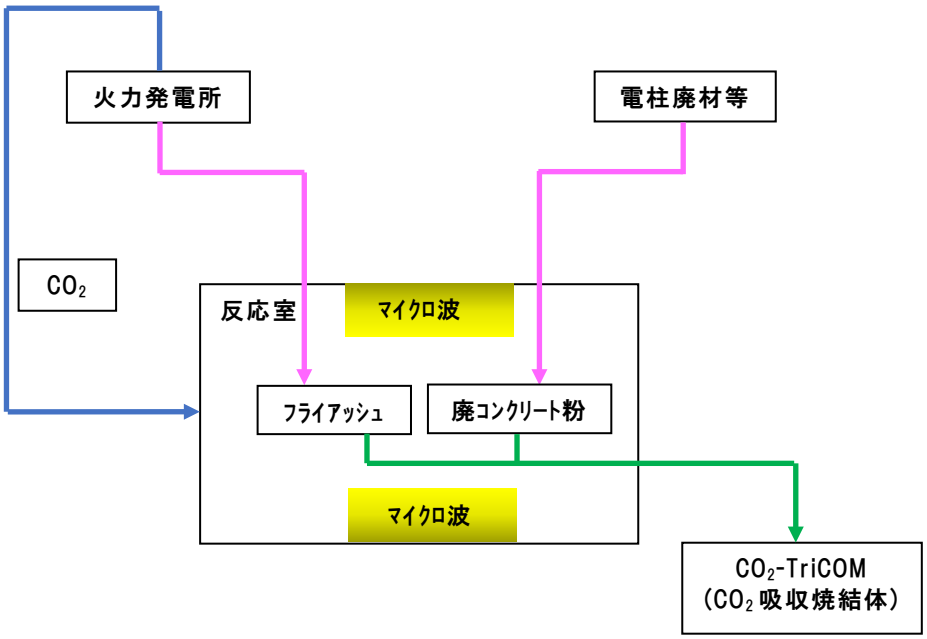
3.2.2　CO_2吸収・利用に係る技術

本節では、前述した対象技術をそれぞれ技術シートに取り纏めるとともに、その技術概要から現時点でのコンセプトを整理することとした。

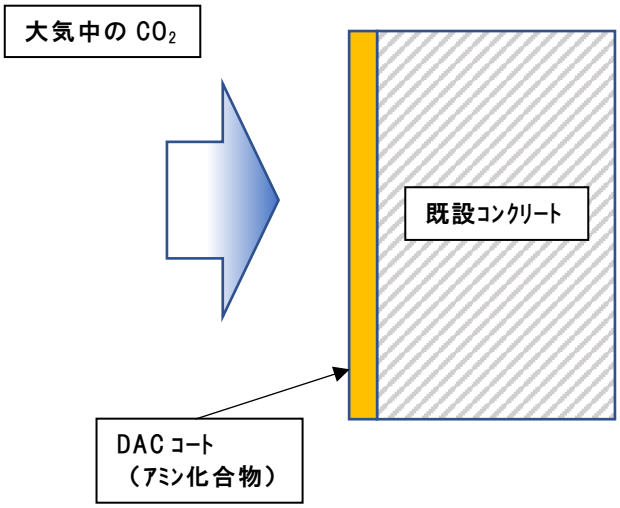
(1) CO_2-SUICOM

技術名	CO_2-SUICOM	整理番号	K-001
保有会社	鹿島建設㈱、中国電力㈱、デンカ		
概念図			

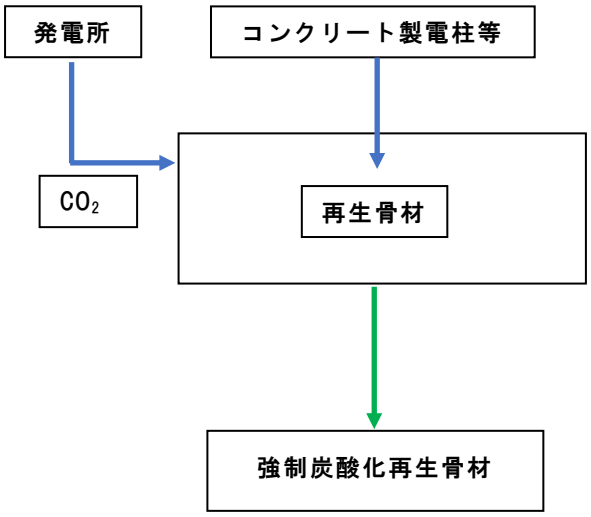
(2) CO_2-TriCOM

技術名	CO_2-TriCOM	整理番号	K-002
保有会社	中国電力（株）　広島大学　中国高圧コンクリート工業（株）		
概念図			

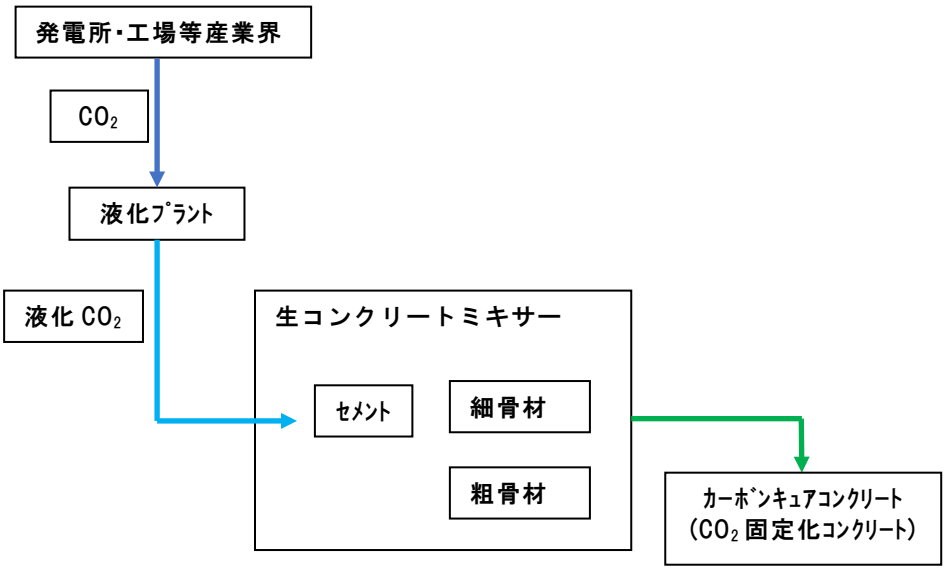
(3) DAC コート

技術名	DAC コート	整理番号	K-003
保有会社	清水建設㈱		
概念図			

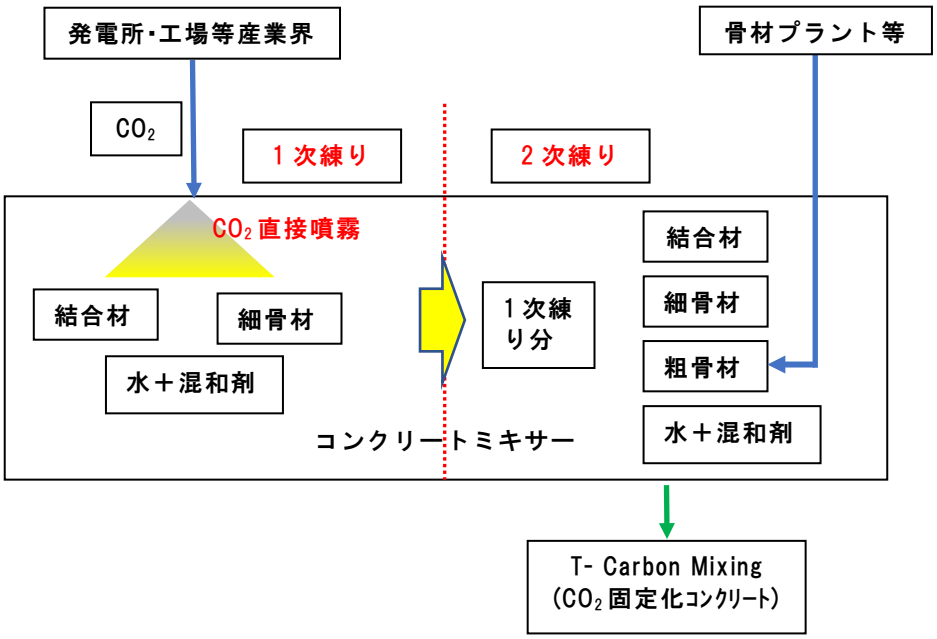
(4) 強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート

技術名	強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート	整理番号	K-004
保有会社	東京電力 HD		
概念図			

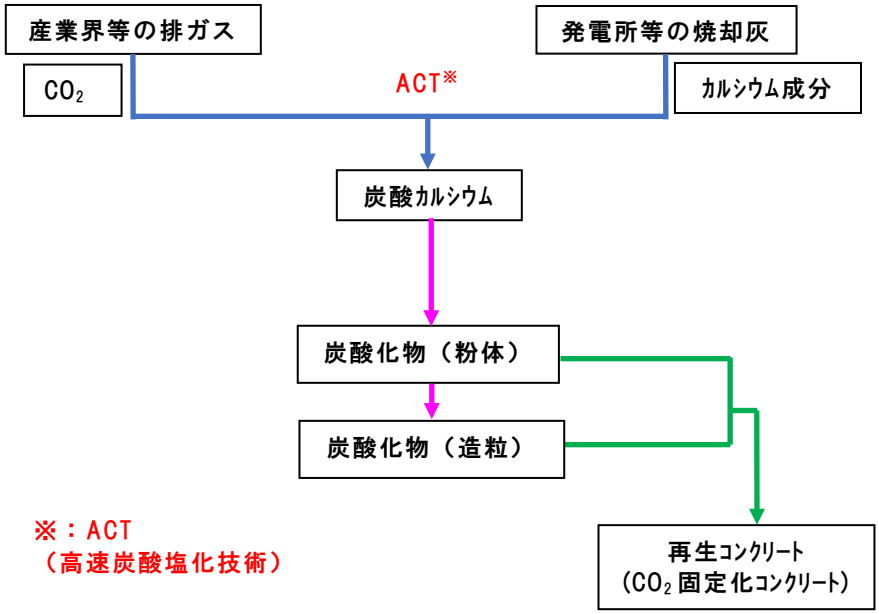
(5) カーボンキュア

技術名	カーボンキュア	整理番号	K-005
保有会社	カーボンキュア社、三菱商事		
概念図			

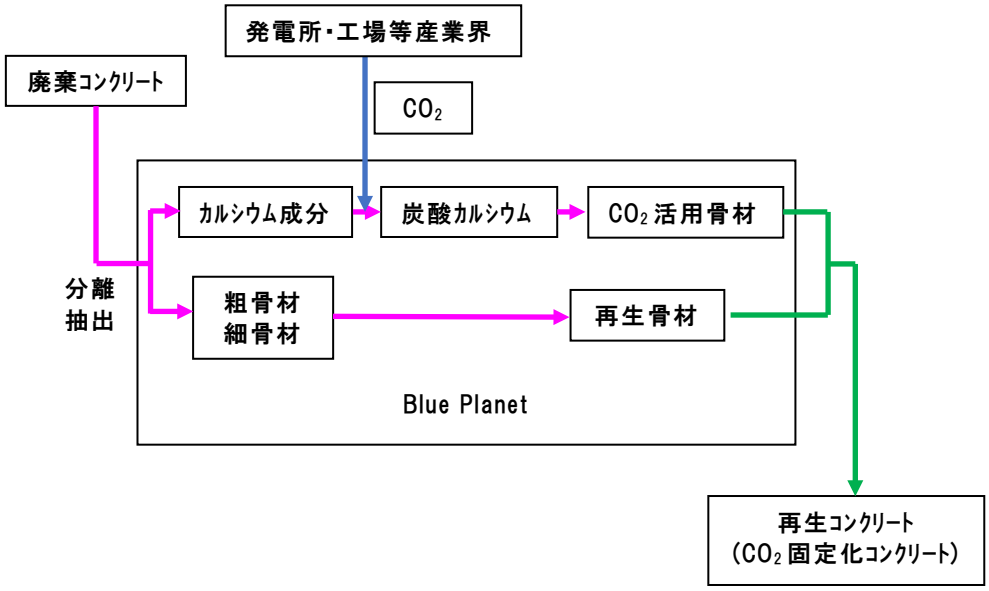
(6) T-Carbon Mixing

技術名	T-Carbon Mixing	整理番号	K-006
保有会社	大成建設㈱		
概念図			

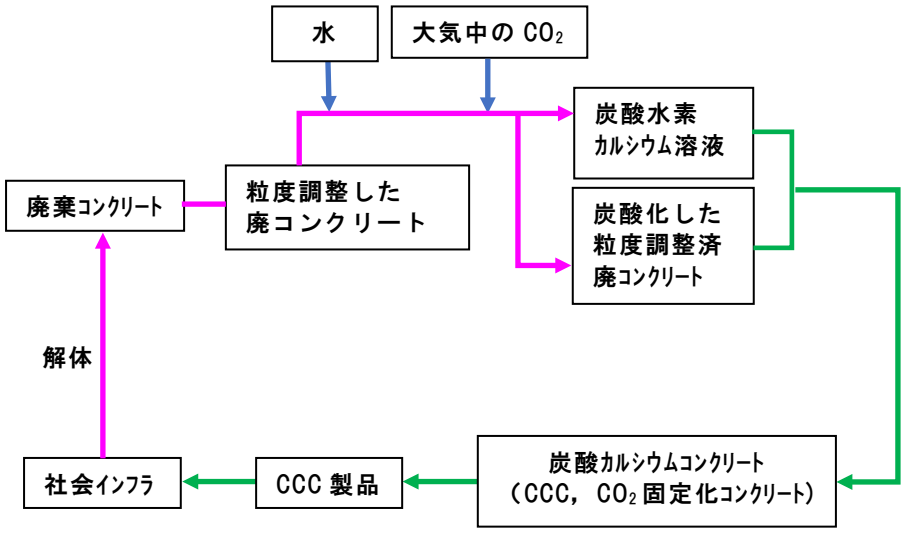
(7) O.C.O Technology

技術名	O.C.O Technology	整理番号	K-007
保有会社	三菱商事		
概念図			

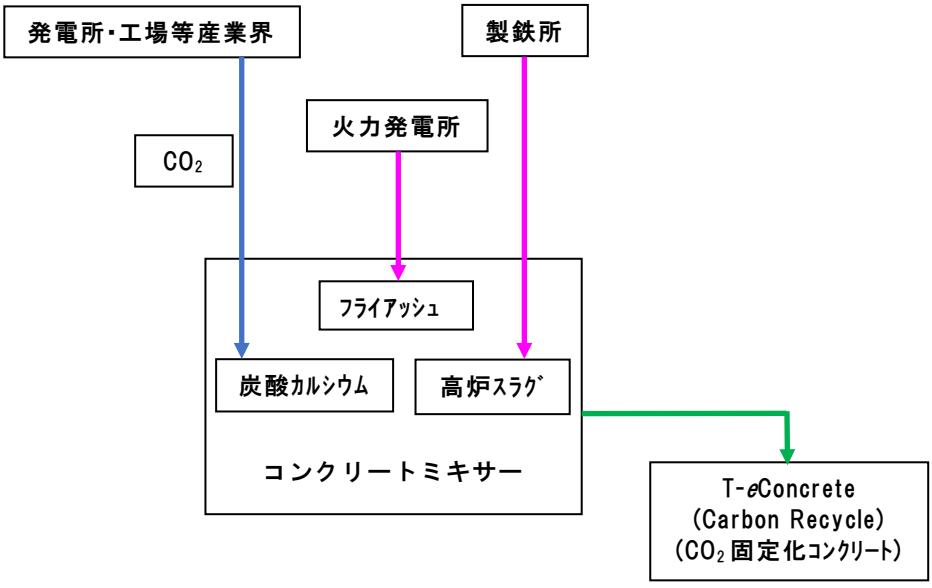
(8) ブループラネット

技術名	ブループラネット（Blue Planet）	整理番号	K-008
保有会社	ブループラネット社、三菱商事		
概念図			

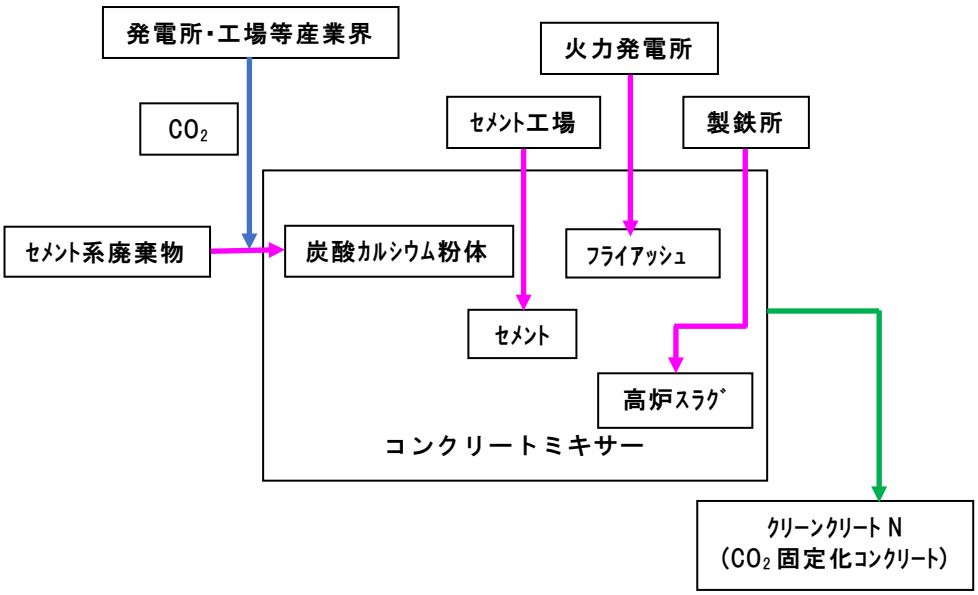
(9) C^4S プロジェクト

技術名	C^4S プロジェクト	整理番号	K-009
保有会社	東京大学、北海道大学		
概念図			

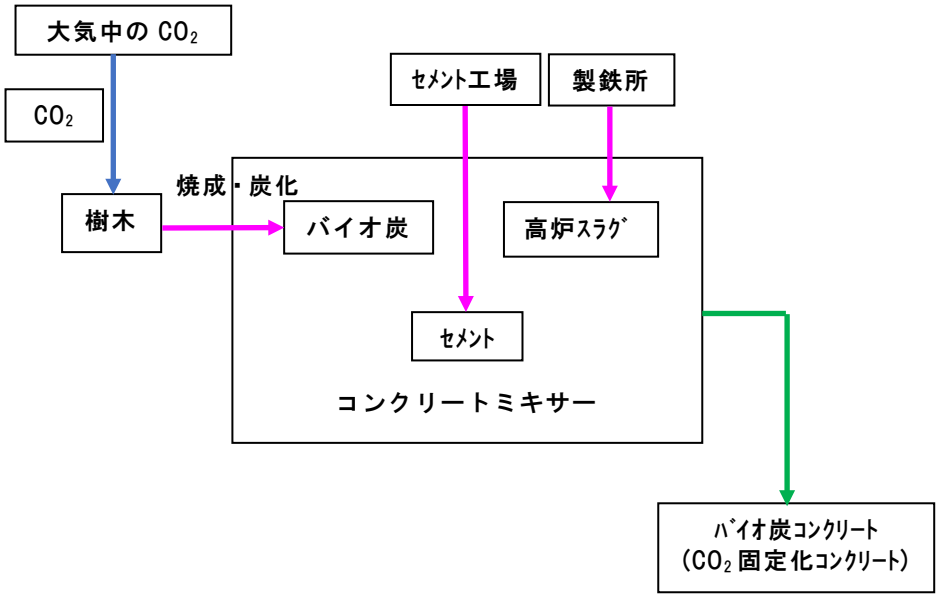
(10) T-*e*Concrete

技術名	T-*e*Concrete（Carbon Recycle）	整理番号	K-010
保有会社	大成建設㈱		
概念図			

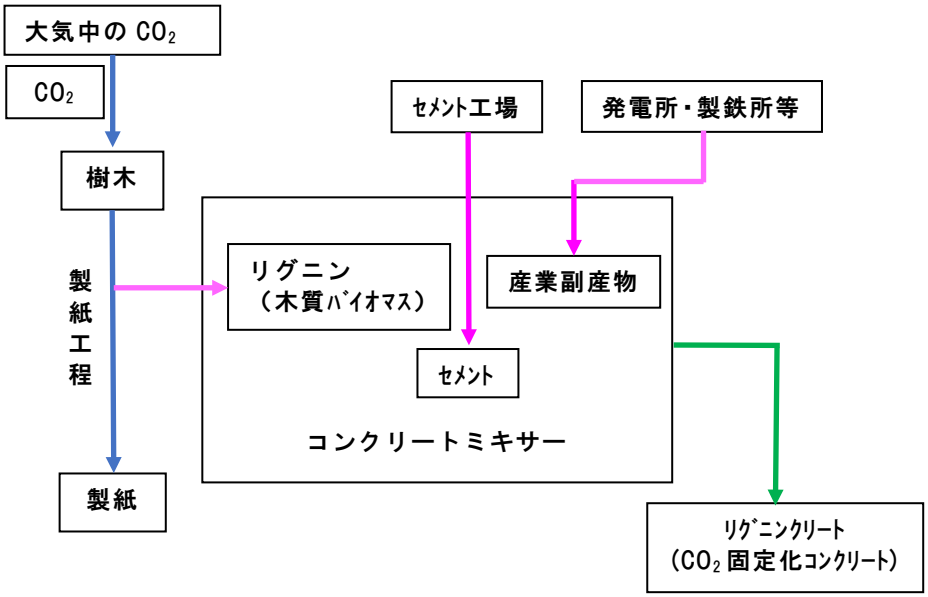
(11)クリーンクリート N

技術名	クリーンクリート N	整理番号	K-011
保有会社	大林組		
概念図			

(12) バイオ炭コンクリート

技術名	バイオ炭コンクリート	整理番号	K-012
保有会社	清水建設（株）		
概念図			

(13) リグニンクリート

技術名	リグニンクリート	整理番号	K-013
保有会社	（株）大林組		
概念図			

3.2.3　CO_2低減に係る技術

(1) ECM（エネルギーCO_2ミニマム）コンクリート

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ＥＣＭコンクリート</td><td>整理番号</td><td>T-001</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">鹿島建設㈱、㈱竹中工務店、</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td>従来セメント量の 60～70%を置換</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>○</td><td>石膏を使用</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 60%</td></tr>
</table>
建設材料技術性能証明（一般社団法人 日本建築総合試験所, GBRC 材料証明 第 13-11 号 改 2）を取得済み
</td></tr>
</table>

(2) T-*e*Concrete（フライアッシュ活用型）

<table>
<tr><td>技術名</td><td>T-*e*Concrete（フライアッシュ活用型）</td><td>整理番号</td><td>T-002</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">大成建設</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td>60～70%はフライアッシュと高炉スラグに置換</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 80%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(3) スーパーグリーンコンクリート

<table>
<tr><td>技術名</td><td>スーパーグリーンコンクリート</td><td>整理番号</td><td>T-003</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">前田建設工業</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td>従来使用するセメント量の 70%以上はフライアッシュと高炉スラグに置換</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2 低減率</td><td>約 60%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(4) LHC（ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート）

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ＬＨＣ（ﾛｰｶｰﾎﾞﾝﾊｲﾊﾟﾌｫｰﾏﾝｽｺﾝｸﾘｰﾄ）</td><td>整理番号</td><td>T-004</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">安藤・間</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td rowspan="3">一部をフライアッシュと高炉スラグに置換。セメント：フライアッシュ：高炉スラグの比率は６：２：２</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2 低減率</td><td>約 55%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(5) BBFA（高強度コンクリート）

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ＢＢＦＡ（高強度コンクリート）</td><td>整理番号</td><td>T-005</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">安藤・間</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td rowspan="3">一部をフライアッシュと高炉スラグに置換。高炉セメントＢ種とフライアッシュとの比率は８：２</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 50%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(6) アッシュクリート（石炭灰（原紛）を大量に用いた硬化体（ペースト））

<table>
<tr><td>技術名</td><td>アッシュクリート
（低炭素コンクリート）</td><td>整理番号</td><td>T-006</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">安藤・間</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>○</td><td>一部をフライアッシュと高炉スラグに置換</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td>石炭灰（原紛）1,000～1,200kg/㎥利用</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>○</td><td>脱硫石膏</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 60%</td></tr>
</table>
硬化促進剤として海水を利用した実績あり
</td></tr>
</table>

(7) ジオポリマー（低炭素コンクリート）

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ジオポリマー（低炭素コンクリート）</td><td>整理番号</td><td>T-007</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">大分高専、山口大学、鉄道総研、西松建設</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>―</td><td>使用しない</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td>アルカリシリカ粉末として</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td>アルカリシリカ粉末として</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>○</td><td>アルカリシリカ溶液として水ガラスと苛性ソーダを混ぜた溶液</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 70%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(8) AAM コンクリート

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ＡＡＭコンクリート</td><td>整理番号</td><td>T-008</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">西松建設、ＪＦＥスチール、東北大、日大</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>―</td><td>使用しない</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>―</td><td>使用しない</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td>アルカリシリカ粉末として</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>―</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>○</td><td>アルカリシリカ溶液として水ガラスと苛性ソーダを混ぜた溶液</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 75%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(9) ポリマークリート

<table>
<tr><td>技術名</td><td>ポリマークリート</td><td>整理番号</td><td>T-009</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">大林組、ポゾリスソリューションズ</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>—</td><td>使用しない</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td>アルカリシリカ粉末として</td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td>アルカリシリカ粉末として</td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>○</td><td>アルカリシリカ溶液を使用</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 75%</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

(10) サスティンクリート（ゼロセメントコンクリート）

<table>
<tr><td>技術名</td><td>サスティンクリート
（ゼロセメントコンクリート）</td><td>整理番号</td><td>T-010</td></tr>
<tr><td>保有会社</td><td colspan="3">三井住友建設</td></tr>
<tr><td>概略組成</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>構成材料</th><th>仕様の有無</th><th>備　　考</th></tr>
<tr><td>セメント</td><td>—</td><td>使用しない</td></tr>
<tr><td>フライアッシュ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>高炉スラグ</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>シリカヒューム</td><td>○</td><td></td></tr>
<tr><td>その他</td><td>—</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2低減率</td><td>約 80%</td></tr>
</table>
特許出願中
</td></tr>
</table>

(11) T-*e*Concrete（セメント・ゼロ型）

技術名	T-*e*Concrete（セメント・ゼロ型）	整理番号	T-011
保有会社	大成建設		
概略組成			

構成材料	仕様の有無	備　　考
セメント	―	使用しない
フライアッシュ	―	使用しない
高炉スラグ	○	
シリカヒューム	―	
その他	○	特殊反応剤
CO_2低減率		約 80%

(12) クリーンクリート

技術名	クリーンクリート	整理番号	T-012
保有会社	大林組		
概略組成			

構成材料	仕様の有無	備　　考
セメント	○	従来のセメント量の一部を高炉スラグやフライアッシュに置換
フライアッシュ	○	
高炉スラグ	○	
シリカヒューム	―	
その他	○	
CO_2低減率		約 80%

(13) T-*e*Concrete（建築基準法対応型）

技術名	T-*e*Concrete（建築基準法対応型）	整理番号	T-013
保有会社	大成建設		
概略組成			

構成材料	仕様の有無	備　　考
セメント	○	一部を高炉スラグに置換
フライアッシュ	―	
高炉スラグ	○	
シリカヒューム	―	
その他	―	
CO_2低減率		約 60%

(14) スラグリート

技術名	スラグリート	整理番号	T-014
保有会社	戸田建設		
概略組成			

構成材料	仕様の有無	備　　考
セメント	○	従来のセメント量の 70～90%を高炉スラグに置換
フライアッシュ	―	
高炉スラグ	○	
シリカヒューム	―	
その他	○	
CO_2低減率		約 70%

3.2.4　CO_2吸収・利用及び低減技術のまとめ

表 3.2.4-1 にコンクリート分野における CO_2吸収・利用及び低減技術の一覧を示す。

表 3.2.4-1　CO_2吸収・利用及び低減に係るコンクリート技術一覧

○：該当する・適用可能　　＊：技術開発実施中

分類	分野	番号	技術名称	開発企業 開発機関	開発状況			適用対象					技術タイプ				吸収（固定）するCO_2タイプ					CO_2吸収のタイミング					セメント低減量			使用混和材				その他使用材料				
					室内試験	試験施工	実施工	現場打設（無筋）	現場打設（鉄筋）	PCa製品（無筋）	PCa製品（鉄筋）	その他（綠化基盤・盛土材）	吸収	利用	低減	排出量ゼロ以下	大気中	排ガス等	液体CO_2等	CO_2ボンベ	その他	事前に混入	練混ぜ時	養生時	養生後共用時	その他	100%	50%以上	50%未満	高炉スラグ	フライアッシュ	γC_2S	炭酸カルシウム	バイオ炭	リグニン	アミンアミノ酸	アルミナシリカ	シリカヒューム
吸収系	直接吸収	①	CO_2-SUICOM	鹿島建設・中国電力・デンカ			○	＊	＊	○	＊		○	○	○	○		○		○				○					○		○	○	○						
		②	CO_2-TriCOM	中国電力・広島大学・中国高圧コンクリート工業	○							○	○	○	○			○				○							○		○		○						
		③	DACコート	清水建設・北海道大学		○		○	○	○	○		○				○	○							○				○						○				
		④	強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート	東京電力HD	○	＊		＊	＊	＊	＊		○	○				○				○																	
	製造時投入	⑤	カーボンキュア	カーボンキュア社・三菱商事			○	○	○	○	○			○	○				○				○						○										
		⑥	T-Carbon Mixing	大成建設	○			＊	＊	＊	＊		○				＊	＊	＊	＊			○				○			○	○		○						
	炭酸カルシウム材投入	⑦	O.C.O	O.C.O社			○	○	○	○	○			○		○		○				○							○				○						
		⑧	ブループラネット	ブループラネット社・三菱商事		○		○	○	○	○		○	○		○			○	○		○							○				○						
		⑨	CCC（C^4Sプロジェクト）	東京大学・北海道大学	○			○	○	○	○			○		○	○						○						○				○						
		⑩	T-eConcrete（Carbon-Recycle）	大成建設			○	○	○					○		○		○					○				○			○	○		○						
		⑪	クリーンクリートN	大林組			○	○	○	○	○			○	○	○		○					○					○		○	○		○						
	バイオ系材料（バイオ炭等）を投入	⑫	バイオ炭コンクリート	清水建設			○	○	○	○	○			○		○	○？				○？		○						○	○				○					
		⑬	リグニンクリート	大林組・日本製紙・フローリック		○		○		○				○			○				○		○												○				
低減系	一部フライアッシュ	⑭	ECMコンクリート	鹿島建設・竹中工務店			○	○	○						○													○		○	○							
		⑮	T-eConcrete（フライアッシュ活用型）	大成建設			○	○	○						○														○	○	○							
		⑯	スーパーグリーンコンクリート	前田建設工業			○	○	○						○													○		○	○							
		⑰	LHC（ﾛｰｶｰﾎﾞﾝﾊｲﾊﾟﾌｫｰﾏﾝｽｺﾝｸﾘｰﾄ）	安藤ハザマ			○	○	○	○	○				○														○	○	○							
		⑱	BBFA高強度コンクリート	安藤ハザマ			○	○	○	○	○				○														○	○	○							
		⑲	アッシュクリート	安藤ハザマ			○	○		○					○														○	○	○			○				
	セメントを使用しない	⑳	ジオポリマー	西松建設・大分高専・日本興業		○				○					○												○			○	○					○		
		㉑	AAMコンクリート	西松建設・JFEスチール・東北大・日大			○	○	○	○	○				○												○			○								
		㉒	現場打設型ジオポリマー「ポリマークリート」	大林組・ポゾリスソリューションズ			○	○	○						○												○			○	○							○
		㉓	サスティンクリート	三井住友建設	○	○	○	○	○	○	○				○													○	○	○	○						○	
		㉔	T-eConcrete（セメント・ゼロ型）	大成建設			○	○	○	○	○				○												○			○			○					
	大部分を高炉スラグ	㉕	クリーンクリート	大林組			○	○	○	○	○				○													○		○	○							○
		㉖	T-eConcrete（建築基準法対応型）	大成建設			○	○	○						○													○		○								
		㉗	スラグリート	戸田建設・西松建設			○	○	○						○													○		○								

参考文献

1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）（2020）：令和元年度海外炭開発支援事業海外炭開発高度化等調査「海外カーボンリサイクル技術実現可能性調査」のポイント

2) 日本コンクリート工学会（2021）：コンクリート工学誌, vol.59, No.9（2021 年 9 月号）

3.3　CO_2低減に関連する土木技術

3.3.1　フライアッシュ有効利用

(1) フライアッシュの排出・利用実績

一般財団法人カーボンフロンティア機構（JCOAL）（旧称「石炭フロンティア機構」、2021 年 3 月までは「石炭エネルギーセンター」）では、石炭火力発電等の石炭焚きボイラーから発生する石炭灰（クリンカ含む）の実態調査を毎年実施しており、その報告書 [1)]によると 2021 年度における石炭灰の年間発生量および有効利用量は表 3.3.1-1 に示すとおりである。なお実態調査では、電気事業については日本フライアッシュ協会にて実施した集計を基に整理し、一般産業については石炭灰混合材料を生産する事業所に関する公開情報を参考に選定して配布したアンケート調査の回答を集計・整理している。

表 3.3.1-1　石炭灰発生量および有効利用量 [1)]

	石炭灰発生量（千ｔ）		有効利用量（千ｔ）		有効利用率	
	2021 年度	前年度比	2021 年度	前年度比	2021 年度	前年度比
電気事業	8,849	+649 (+7.9%)	8,556	+556 (+7.0%)	96.7%	▲0.9pt
一般産業	3,708	▲163 (▲4.2%)	3,576	+30 (+0.8%)	96.4%	+4.8pt
全体	12,557	+486 (+4.0%)	12,132	+586 (+5.1%)	96.6%	+0.9pt

一般産業での石炭灰発生量は減少したものの、電気事業および全体での発生量は増加しており、有効利用量はいずれも増加している。ただし、電気事業での有効利用率は減少している。石炭灰発生量の推移を図 3.3.1-1 に、全体での石炭灰有効利用量の推移を図 3.3.1-2 に示す。

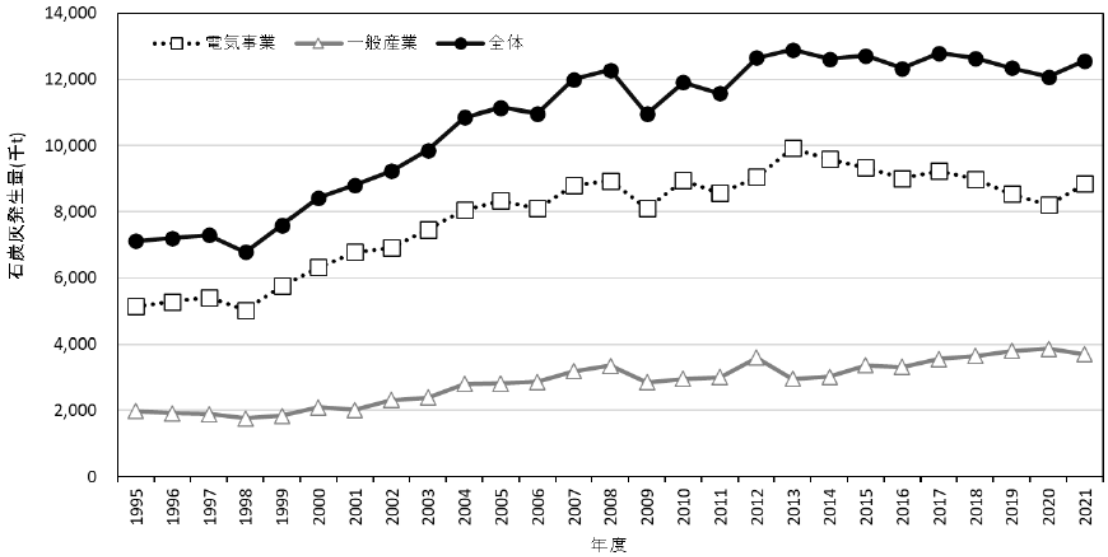


図 3.3.1-1　石炭灰発生量の推移 [1)]（出典：石炭フロンティア機構，2023）

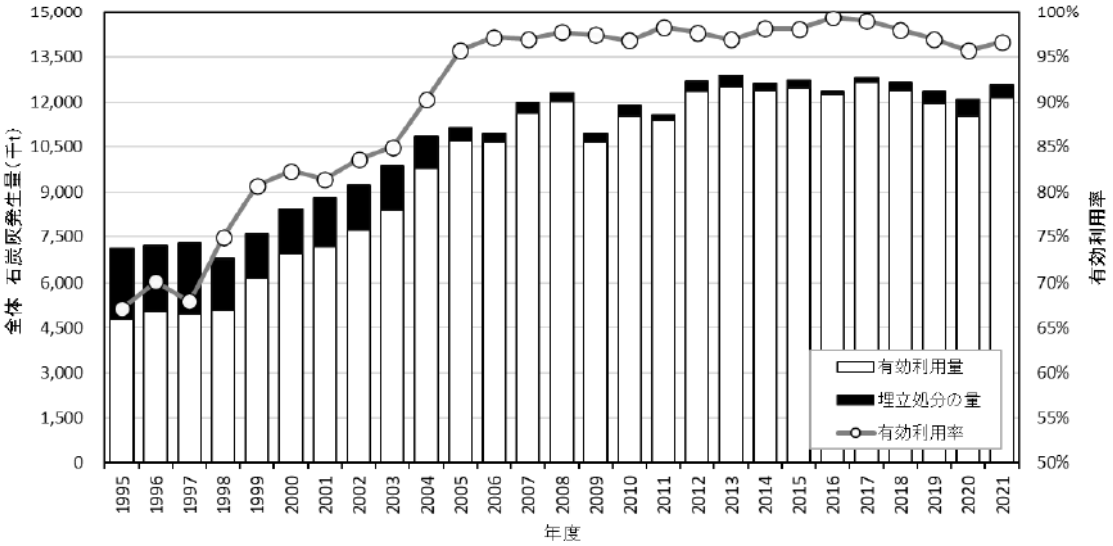


図 3.3.1-2　石炭灰有効利用量の推移（全体）[1)]（出典：石炭フロンティア機構，2023）

石炭灰の有効利用先としては、セメント分野が最も多く、次いで土木分野となっており、近年は分野ごとの有効利用量の大幅な変化は見られない。2021 年度における全体での石炭灰の分野別有効利用量を表 3.3.1-2 に、分野別有効利用量の推移を図 3.3.1-3 に示す。

表 3.3.1-2　石炭灰の分野別有効利用量（全体）[1)]

	有効利用量（千ｔ）		有効利用構成比	
	2021 年度	前年度比	2021 年度	前年度比
セメント分野	8,176	+141 (+1.8%)	67.4%	▲2.2pt
土木分野	1,254	+9 (+0.7%)	10.3%	▲0.5pt
建築分野	631	+39 (+6.6%)	5.2%	+0.1pt
農林・水産分野	78	▲23 (▲22.8%)	0.6%	▲0.3pt
その他	1,997	＋424 (＋27.0%)	16.5%	＋2.9pt
合計	12,135	+589 (+5.1%)	－	－

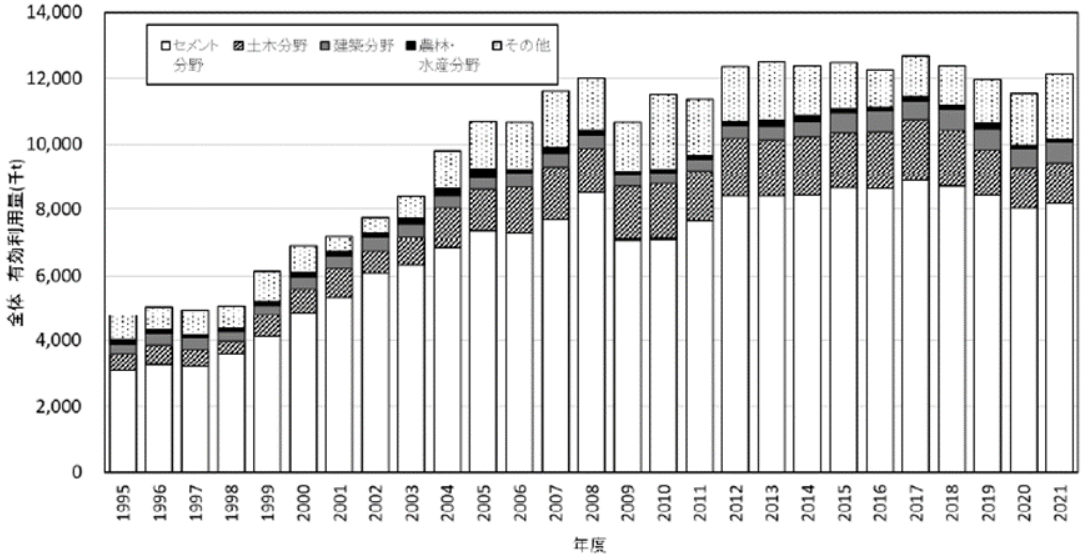


図 3.3.1-3　石炭灰の分野別有効利用量の推移（全体）[1)]

（出典：石炭フロンティア機構，2023）

(2) フライアッシュ活用技術

石炭灰の有効利用については、1955 年頃から資源としての有効性が着目されはじめ、当初はコンクリート混和材とすることから研究が進められ、その結果、信頼性を特に要求されるダムに活用され始めた [2)]。その後、石油火力発電の隆盛に伴い石炭灰発生量が減少し、有効利用技術の開発が一次停滞したが、2 度の石油危機を経て石炭灰発生量増加傾向に変化すると、ダム、橋梁、発電所等の大型コンクリート構造物に大量に使用されるようになった。また、1978 年頃からは粘土代替としてセメント原料に使用されるようになり、2021 年度には 7,975 千 t（65.7%）がセメント原材料として使用されている [1)]。各分野での利用用途を表 3.3.1-3 に示す。

表 3.3.1-3　石炭灰の分野別有効利用用途（全体）[1)]

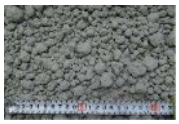
分野	用途	分野	用途
セメント分野	セメント原材料 セメント混合材 コンクリート混和材	建築分野	建材ボード 人工軽量骨材 コンクリート二次製品
土木分野	地盤改良材 土木工事用 電力工事用 道路路盤材 アスファルト・フィラー材 炭坑充填材	農林・水産分野	肥料（融雪剤含む） 魚礁 土壌改良材
		その他	下水汚水処理剤 製鉄用 その他

近年では、土木分野での「石炭灰混合材料」が着目され、その普及・拡大が進められている。また、新たな技術として「ジオポリマー」への関心が高まっている。

① 石炭灰混合材料

石炭灰混合材料とは、石炭灰にセメント、水、必要に応じて土砂、石膏等を混合した材料であり、地盤・土構造物に用いられるほか、建材、ブロック等としても用いられ、地盤材料として用いられるものは、その形態によって、破砕材、造粒材、塑性材、スラリー材に大別される[3)]。なお、指針・ガイドラインによって対象とする石炭灰混合材料は異なり、文献 3)ではフライアッシュを主原料とする地盤・土構造物に用いられるものに限定しているが、文献 4)ではクリンカ混合物や新素材コンクリートも含めている。石炭灰混合材料の概要[3,4)]を表 3.3.1-4 に示す。

表 3.3.1-4　石炭灰混合材料[3,4)]（写真の出典：石炭エネルギーセンター，2018）

形態（種別）		概要（製造方法等）	写真（例）
粒状材	破砕材	石炭灰にセメント、水、必要に応じて副添加材、土砂等を混合して一旦固化させた後、掘削・破砕。	
	造粒材	石炭灰にセメント、水、必要に応じて副添加材、土砂等を加えて造粒して製造。	
塑性材		施工場所近傍において、石炭灰にセメント、水、必要に応じて副添加材、土砂等を攪拌混合して製造。締固めにより施工。	
スラリー材		施工場所近傍において、石炭灰にセメント、水、必要に応じて副添加材、土砂等を攪拌混合して製造。固化前はスラリー状を呈する。固化前に圧送、打設することで施工。	
クリンカ混合物 クリンカアッシュ		クリンカアッシュに建設発生土または浚渫土を混合して製造。クリンカアッシュ単体での使用も可能。	
新素材コンクリート		石炭灰にセメント、スラグ骨材および海水を混合して製造。	

粒状材は製造方法の違いにより破砕材と造粒材に区分されるが、いずれも固化、粒度調整された状態で出荷・施工される材料である。土砂代替として用いられる粒状材は、一般的に砂質土から礫質土に相当するせん断強さと圧縮性を有し、盛土材や路床材等に適用可能である。砕石代替として用いられる粒状材は、再生路盤材としての力学特性を確保するため、セメント添加率がやや高めになっている。

塑性材は、固化前の土砂状を呈した状態のときに敷均し・締固め施工される材料である。固化後は一体化した固化体になることで、地盤や盛土等に必要な物理特性と力学特性を発現する。

スラリー材は、固化前は高い流動性と充填性を持ち、圧送・打設することで施工される材料である。改良体として用いる場合には、適用箇所に求められる物理特性に加えて、施工に必要な流動性を満たすよう配合設計を行い、固化後は一体化した固化体になることで必要な物理特性を有する改良体が構築される。

標準的な配合例を表 3.3.1-5 に示す[3)]。

表 3.3.1-5　標準的な配合例（質量比）[3)]

形態（種別）		フライアッシュ	固化材		水	その他	
			セメント	副添加材		土砂等	添加剤等
粒状材	土砂代替	100	4～8	0～10	20～40※	0～	0～
	砕石代替	100	15～30	0～	20～40※	0～	0～
塑性材		100	4～10	1～2	20～40※	0～	0～
スラリー材		100	6～20	0～	40～150	0～400	0～

※フライアッシュ単味で締固め試験を行うことで求めた最適含水比程度

従来使用してきた材料の代替材料として石炭灰混合材料を適用することにより、環境負荷の軽減および機能向上が期待される。石炭灰混合材料の想定適用対象と適用メリットを表 3.3.1-6 に示す[4)]。

表 3.3.1-6　石炭灰混合材料[4)]（出典：石炭エネルギーセンター，2018）

形態（種別）	適用対象	適用するメリットの例（個別には各材料の特性確認が必要）
粒状材（破砕材、造粒材）	埋立て・裏込め・道路・盛土材料、地盤材料	・軽量：土圧低減、沈下抑制、施工性向上（ただし、水位以下への適用は困難） ・締固め特性良好：施工性向上、側方土圧低減 ・非圧縮性：裏込めや盛土の沈下防止 ・良好な透水性：排水性向上、トラフィカビリティ改善、凍上防止対策等
塑性材	道路・盛土・築堤材料	・軽量：土圧低減、沈下抑制、施工性向上（ただし、水位以下への適用は困難） ・締固め特性良好：施工性向上、側方土圧低減 ・非圧縮性：裏込めや盛土の沈下防止 ・良好な透水性：排水性向上、トラフィカビリティ改善、凍上防止対策等
スラリー材	裏込め・腹付け材料、補強・機能向上	・流動性：施工性向上
新素材コンクリート	二次製品	・石炭灰を適切に配合することによるコンクリート品質の向上 ・現場に適した製品を選択することによる施工性向上（石炭灰混合材料に限らず、二次製品を適用するメリット）

② ジオポリマー[5)]

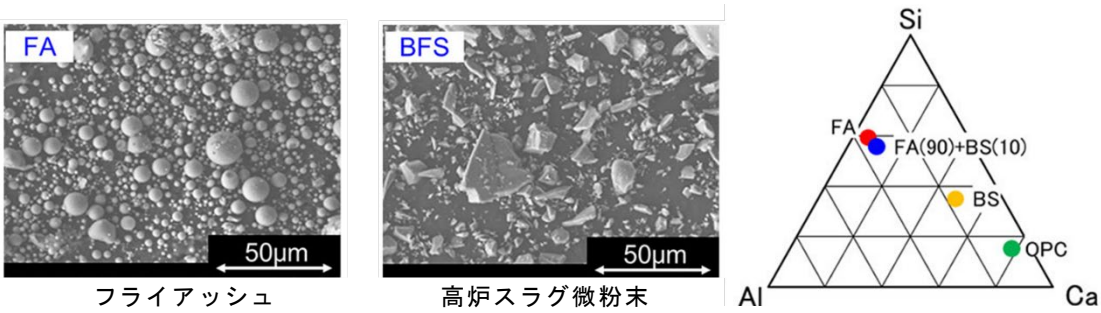
ジオポリマーとは、フライアッシュ等のアルミナシリカ粉末と水ガラス等のアルカリ溶液の縮重合反応で生成される固化体の総称である。セメントを使用しないことから CO_2 発生量の大幅削減、フライアッシュ等の産業副産物の大量消費、重金属や放射性廃棄物の固定など、環境問題解決の有力な手段のひとつとして期待されている。

a) ジオポリマーの材料

一般的には活性フィラーとアルカリシリカ溶液が使用される。

活性フィラーとは、アルカリ環境下でジオポリマーの生成反応を示すガラス質(非晶質)を含んだ粉体を示し、フライアッシュ（FA）や高炉スラグ微粉末（BFS）が挙げられる。活性フィラーの代表写真と組成例を図 3.3.1-4 に示す。

アルカリシリカ溶液とは、シリカを含み、高いアルカリ性により活性フィラーを溶解させることのできる溶液を示し、比較的高い pH のケイ酸ナトリウム溶液、アルカリ水酸化溶液などが挙げられる。原料として、水ガラス、苛性ソーダなどが使用される。水ガラスの他にもシリカフューム(SF)を苛性ソーダなどのアルカリ溶液に混ぜる場合もある。



フライアッシュ　高炉スラグ微粉末

活性フィラーの代表写真　活性フィラーの組成例

図 3.3.1-4　活性フィラーの代表写真と組成例 [5)]

（出典：日本コンクリート工学ホームページ）

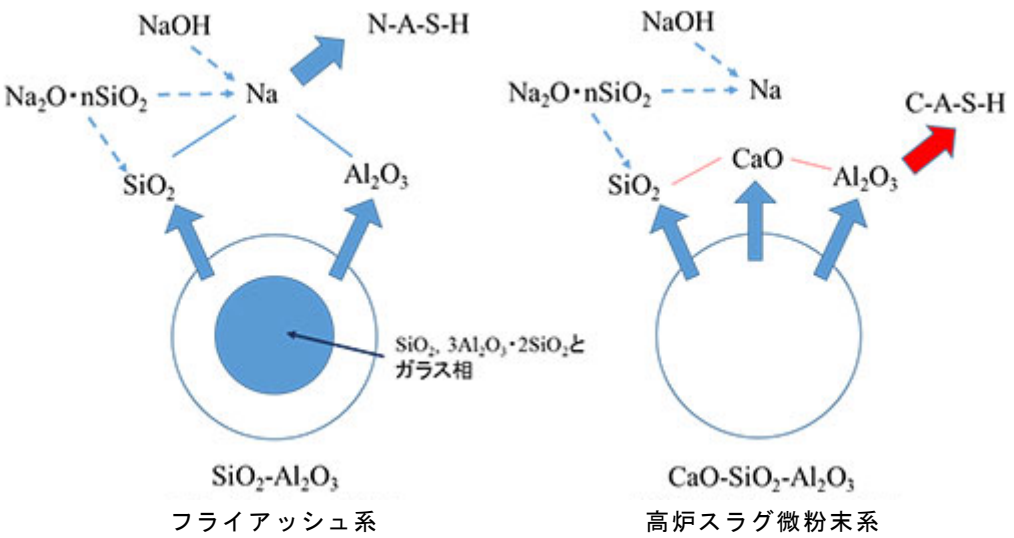
b) 生成方法（ジオポリマーの練り混ぜと養生）

練り混ぜは、一般的なセメントコンクリートと同じで、活性フィラーと骨材を投入して空練りしてから、アルカリシリカ溶液を投入し練り混ぜる。材料と配合によっては，増粘剤を添加したセメントコンクリートのように高い粘性を示すことがある。

養生は、セメントコンクリート二次製品のように加温する場合と常温で静置する場合がある。縮重合反応を示すジオポリマーにとって、加温は重要であることから、60～80℃で数時間静置させて反応を促進させることが多い。

c) 反応機構

ジオポリマーは、使用する活性フィラーやアルカリシリカ溶液によって複数の反応が並行して起きると考えられている。反応機構のすべてが解明されている訳ではないが、活性フィラーの種類に応じて図 3.3.1-5 に示すような反応が進んでいると考えられている。



フライアッシュ系　　高炉スラグ微粉末系

図 3.3.1-5　ジオポリマー反応機構（イメージ）[5)]

（出典：日本コンクリート工学ホームページ）

d) 材料特性

ジオポリマーは、セメントコンクリートと比較するとカルシウム(Ca)の量が少ない特徴を有しており、「酸や硫酸塩に対する抵抗性が高い」「耐火性に優れている」「アルカリシリカ反応を起こしにくい」といった特長が期待されている。一方で、縮重合反応時に起きる脱水現象等によって組織がポーラスになることがあり、「透水係数、透気係数が大きい」「塩化物イオン、炭酸イオンなどが侵入しやすい」といった傾向が懸念されている。

e) 取組み事例【EeTAFCON（イータフコン）】[6,7)]

ジオポリマーに関する取り組み事例として、一般財団法人電力中央研究所と中川ヒューム管工業株式会社と一般財団法人石炭フロンティア機構が共同で開発した「EeTAFCON（イータフコン）」が挙げられる。

EeTAFCON は、従来のセメントを用いるコンクリートに比べ、CO_2 排出量を約 70%削減でき、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の産業副産物を 1m^3 当たり 500kg 以上も利用することが可能である。開発にあたって、プレキャスト製品として実用化するため、工場設備規模に合わせた製造技術の最適化を図り、製品量産化技術を確立している（図 3.3.1-6 参照）。また、マンホール等のプレキャスト製品を各種環境下に施工し、従来のコンクリートでは劣化が問題となる下水道において、高い耐久性を示すことを実証している（図 3.3.1-7 参照）。さらに、構造部材への適用を目指し、鉄筋コンクリート製試験体の構造実験を実施し（図 3.3.1-8 参照）、構造部材への活用に見込みをつけた。

図 3.3.1-6　工場における EeTAFCON 製プレキャスト製品の製造風景 [6)]

（出典：電力中央研究所，2021）

図 3.3.1-7　EeTAFCON 製プレキャスト製品（マンホール）[6)]

（出典：電力中央研究所，2021）

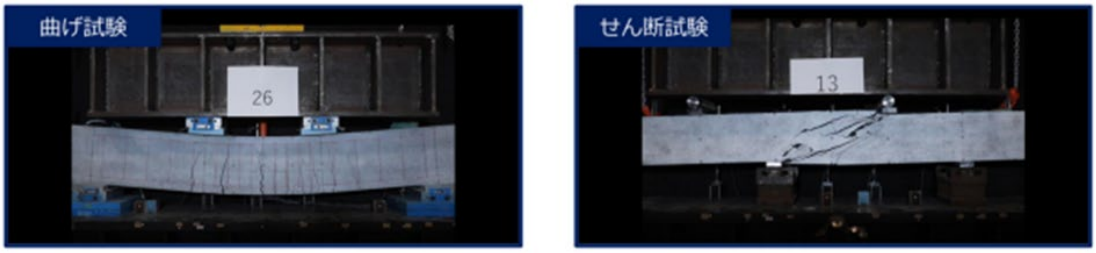


図 3.3.1-8　EeTAFCON 製鉄筋コンクリート梁の構造実験 [6)]

（出典：電力中央研究所，2021）

また、EeTAFCON の製造に関するノウハウを水平展開し、新たな製品開発および普及を加速することを目的として、「EeTAFCON 研究会」が 2022 年 3 月に設立された。

(3) 活用における課題

前述のとおり、2021 年度における石炭灰の有効利用率は 96%以上となっており、その大半がセメント原材料として利用されている。セメント生産量の増加は今後見込まれない中で、石炭灰のセメント原材料（粘土代替）以外での有効利用技術の開発が進められており、適用実績も多くあるが、恒常的に使用している事例は少ない。その理由の一つとして以下の課題が挙げられる[3,8]。

① 品質の安定化

石炭火力発電等の原料となる石炭は海外に依存しており、使用する炭種が多岐にわたることから、石炭灰の品質も多岐にわたる。コンクリート用フライアッシュとしての物理・工学的品質を規定した JIS 規格はあるが、JIS 規格を超えた範囲で利用できる技術も多い。用途に応じた品質の設定項目・許容範囲を適切に定めるとともに、品質の安定化や品質変動を吸収できる技術の開発への取り組みが必要である。

また、石炭灰には重金属等の微量成分が含まれており、環境安全性にも留意する必要がある。安全性評価の基準については、土壌環境基準等があるが、適用基準を明確にするとともに、対象外となる場合には適切な試験方法・基準値を設定して、環境安全品質を確保する必要がある。

② 供給の安定化

石炭灰の供給は、量・品質とも発電所の運転状態に依存するところが大きく、石炭火力発電所等の偏在による地域差も大きい。一定の品質の石炭灰を安定的に供給するためには、中継・貯蔵機能の拡充を図るとともに、発電所間・事業者間での連携を強化して供給網を整備し、全国的な供給体制を構築する必要がある。

③ コスト低減・高付加価値化

石炭灰の有効利用を促進するには、利用者側が利用することのメリットを得られることが必要である。利用することでコスト低減に寄与できる技術や高い費用対効果を生み出す高付加価値技術を開発する必要がある。

④ 仕様書等での基準化

開発した技術が恒常的に利用されるためには、計画・設計段階での採用を図る取り組みが必要である。利用先の事例や利用することのメリットを利用者に対して細かく紹介するとともに、標準的な技術（材料）として認知されるよう仕様書等での基準化を進める必要がある。

参考文献

1) 一般財団法人石炭フロンティア機構（2023）：石炭灰全国実態調査報告書（2021 年度実績）
2) 日本フライアッシュ協会（2021）：石炭灰ハンドブック（令和 3 年版）
3) 土木学会（2021）：石炭灰混合材料を地盤・土構造物に利用するための技術指針（案）
4) 一般財団法人石炭エネルギーセンター（2018）：石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（総合改訂版）
5) 日本コンクリート工学会ホームページ：月刊コンクリート技術（2017 年 6 月号）“古くて新しい建設材料「ジオポリマー」”の可能性と課題(TC-155A：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会), https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/201706_article_1.html（2022/8 アクセス）
6) 一般財団法人電力中央研究所（2021）：サステナブルな次世代コンクリート製品の量産化技術を確立，プレスリリース（2021.7.7）
7) EeTAFCON 研究会ホームページ：https://www.eetafcon.com/（2022/8 アクセス）
8) 土木学会（2003）：石炭灰有効利用技術について－循環型社会を目指して－報告書

3.3.2　CCS

(1) CCSの技術概要

CCS（Carbon Dioxide Capture and Storage）は、大規模な CO_2 発生源である発電所や製鉄所、セメント工場などから排出されるガス中の CO_2 を分離・回収し、それを地中深くに圧入し貯留することによって大気中に CO_2 が放出されるのを抑制する技術である。CO_2 地中貯留の概念図を図 3.3.2-1 に示す [1)]。CO_2 の排出源と CO_2 の貯留に適した地点が離れている場合には、回収した CO_2 をパイプラインで輸送するか、もしくは液化して船舶で輸送する。

これまで海外の CCS では EOR（Enhanced Oil Recovery；石油増産手法の一種）を兼ねた事例が多いが、日本では石油・天然ガスの産地は限定され EOR は期待しにくく、比較的孔隙の多く浸透率の高い砂岩層等の帯水層を貯留層として CCS の適地調査が行われてきた。CO_2 を地中に圧入する場合、CO_2 は液体よりも超臨界状態の方が効率的に圧入できるため、超臨界状態に必要な温度・圧力条件（31.1℃以上かつ 7.38MPa 以上）になるように、地下 800m よりも深い地点に貯留層を計画することが一般的である。

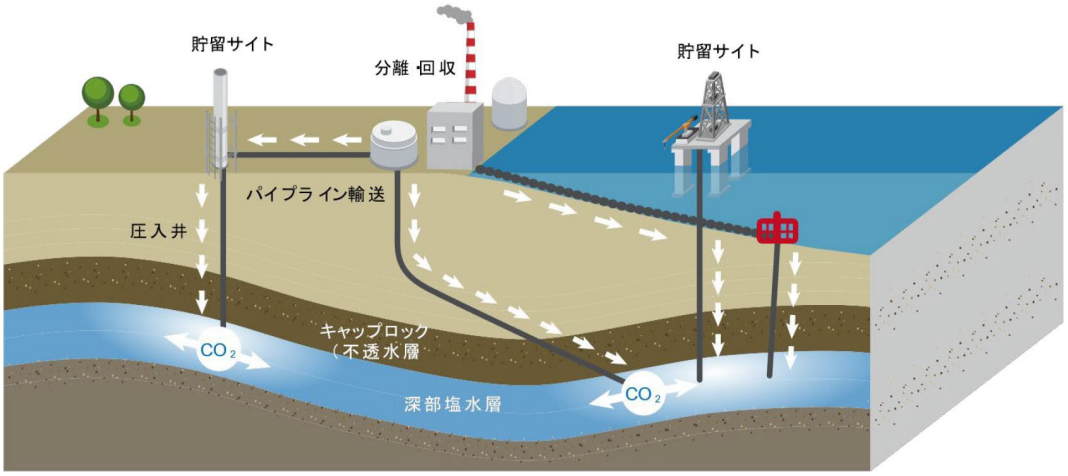


図 3.3.2-1　CO_2 地中貯留の概念図 [1)]

（出典：二酸化炭素地中貯留技術研究組合ホームページ）

(2) CCS 技術動向の既往調査報告書

土木学会エネルギー委員会では「二酸化炭素回収・貯留における調査・研究小委員会」を立ち上げ、2017 年 10 月に「CO_2 輸送・貯留に関する技術動向と土木分野における課題」[2)]（以下「既往調査報告書」という。）を取り纏めている。CR 分科会はカーボンリサイクルに関する土木技術の調査を行うことが主眼であるため、CCS については既往調査報告書で調査した内容から進展の見られた主な事項について調査・整理を行った。既往調査報告書の目次と次節以降に取りまとめた事項の対応を表 3.3.2-1 に示す。その他 CO_2 輸送・貯留に関する技術動向や土木分野の課題については既往調査報告書を参考されたい。

表 3.3.2-1　既往調査報告書の目次と本調査で整理した事項

既往調査報告書の目次	本調査で整理した事項
1. はじめに	－
2. 気候変動対策としての CCS 2.1 気候変動問題 2.2 気候変動枠組条約に基づく取組 2.3 国内における政策 2.4 海外における政策事例 2.5 国際的枠組み等における動向	第 6 次エネルギー基本計画 CCS 長期ロードマップ検討会 カーボンマネジメント小委員会
3. CCS の実証実験事例 3.1 これまで実施された主な実証実験 3.2 近年開始された・今後実施予定の主な実証実験 3.3 我が国が参画するモニタリング研究プロジェクト事例	国内：苫小牧結果, CO_2 船舶輸送実証他 海外：3.2 操業後, ハブ&クラスター構想
4. CCS コスト試算の事例調査 4.1 はじめに 4.2 CCS のコスト構造 4.3 コスト試算事例 4.4 大きなコスト感応度を有する要素の例	発電コスト検証 WG(2021), CCS 長期ロードマップ検討会(2022)
5. これまでに開発された CCS に関わる技術 5.1 CO_2 輸送技術 5.2 CO_2 貯留サイト評価技術 5.3 CO_2 地中挙動シミュレーション技術 5.4 CO_2 化学的影響評価技術 5.5 CO_2 モニタリング技術	（特になし、国内での技術開発は実証事業等で実施）
6. CCS において今後貢献できる土木技術 6.1 貯留層評価のための物理探査技術 6.2 リスク評価技術 6.3 CO_2 漏洩評価技術 6.4 船舶海上輸送におけるインフラ構築技術 6.5 溶解型 CO_2 貯留技術 6.6 石油・天然ガス・地熱分野における CO_2 利用技術	（特になし）
7. おわりに	社会実装における課題

(3) 日本における CCS の取り組み

第 6 次エネルギー基本計画（2021 年 10 月 22 日閣議決定）において、2050 年カーボンニュートラル実現に向けた電力部門に求められる取組みとして、水素・アンモニア発電の活用に並んで CCS の活用が位置付けられ、CCS の技術的確立・コスト低減、適地開発や事業化に向けた環境整備を進めていく方針が示された [3]。2019 年度以降の CCUS の主な取組みを図 3.3.2-2 に示す。

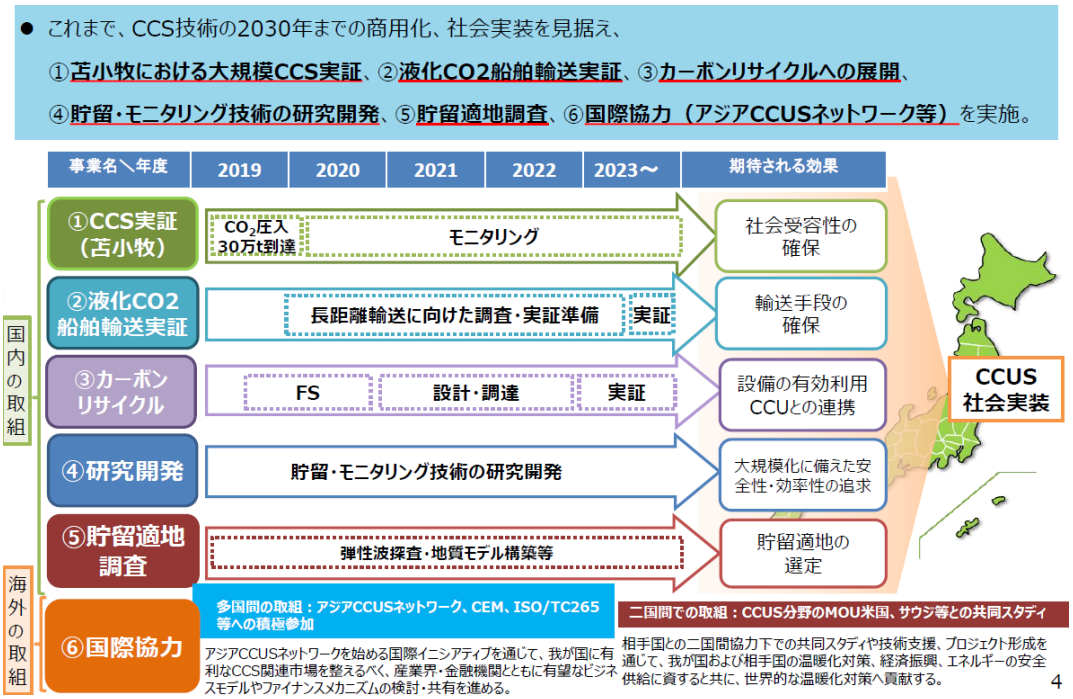


図 3.3.2-2　CCUS に係るこれまでの取組み [3]（出典：経済産業省，2022）

また、2050 年カーボンニュートラル社会の実現を目指すべく、2022 年 1 月に立ち上げられた経済産業省資源エネルギー庁による CCS 長期ロードマップ検討会は、2022 年 5 月に中間とりまとめを行い、同年 9 月からは CCS 事業・国内法検討ワーキンググループと CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキンググループによる議論を重ね、2023 年 3 月に最終とりまとめを発表した [4]。2030 年までの CCS 事業開始の達成に向けて 6 つの具体的アクション項目（CCS 事業への政府支援、CCS コストの低減に向けた取組、CCS 事業に対する国民理解の増進、海外 CCS 事業の推進、CCS 事業法（仮称）の整備に向けた検討、「CCS 行動計画」の策定・見直し）を定め、その内容及びスケジュールを図 3.3.2-3 のように取りまとめた。

その後、2023 年 6 月に総合資源エネルギー調査会 資源・燃料分科会に設置された「カーボンマネジメント小委員会」[5]により、2030 年 CCS 事業化に向けての政府支援の在り方や CCS 事業法（仮称）の整備等についてより具体的な検討がなされ、パブリックコメントを経て 2024 年 1 月に中間取りまとめが発表された。

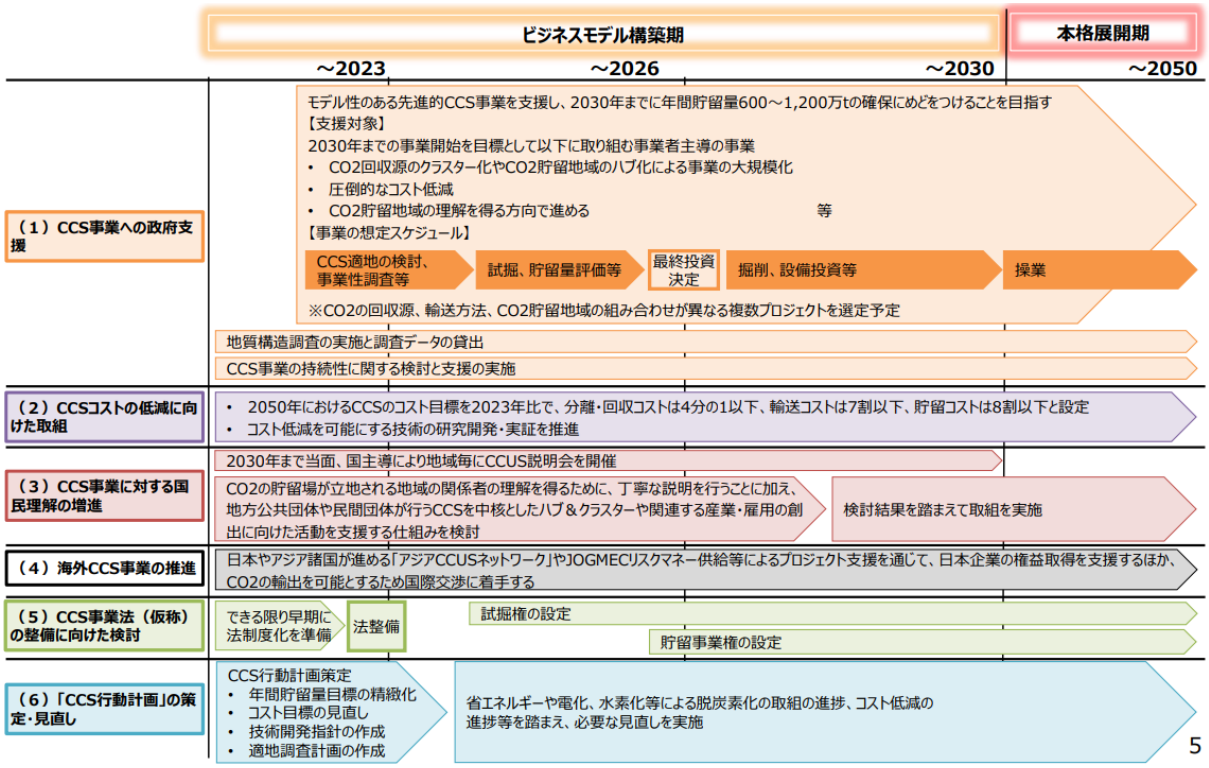


図 3.3.2-3　CCS 長期ロードマップ　最終とりまとめ [4]（出典：経済産業省，2023）

(4) 最近の CCS 実証事業・プロジェクトの事例

ここでは、国内で実施されている CCS 関連の NEDO 事業「CCUS 研究開発・実証関連事業」[6]のうち、「苫小牧における CCUS 大規模実証試験」、「CO_2 輸送に関する実証試験」及び「安全な CCS 実施のための CO_2 貯留技術の研究開発」について主な実施内容を整理した。また、海外については、既往調査報告書の時点で実証事業が開始された Quest プロジェクト、計画段階にあった Petra NovaCO_2 回収プロジェクトや Gorgon CO_2 貯留プロジェクトについて、その後の状況を整理した。

①国内の実証事業

a) 苫小牧における CCUS 大規模実証試験

本実証試験では、北海道苫小牧市において 2012 年度から 2015 年度に実証設備を建設し、2016 年度から CO_2 圧入を開始して 2019 年 11 月までに累計 CO_2 圧入量 30 万トンを達成し、現在はモニタリング継続中である [7]。商業運転中の製油所の水素製造装置から発生する CO_2 を含むガスを約 1.4km の陸上パイプラインで輸送し、化学吸収法（アミン）により回収し、2 本の圧入井により萌別層（深度約 1,100～1,200m、新第三期砂岩層）及び滝ノ上層（深度約 2,400～3,000m、新第三期火山岩類）にそれぞれ圧入した（図 3.3.2-4）。

圧入の結果、累計圧入量は萌別層に 300,012t、滝ノ上層に 98t の計 300,110t となり、圧入期間中において観測した圧力値は、各貯留層上位の遮蔽層の破壊を防ぐために設定し

た上限圧力に対して十分低かった。また、圧入された CO_2 は探査結果により貯留層内に留まっていることが確認され、長期挙動予測シミュレーションにより圧入後 1,000 年後でも貯留層に留まる予想となった。

なお、圧入期間中の 2018 年 9 月 6 日に平成 30 年北海道胆振東部地震（M6.7）が発生し、苫小牧 CCS 実証試験センターでも震度 5 弱相当の揺れを観測したが、地層の圧力・温度について CO_2 の漏洩を示唆するデータは確認されなかった。2018 年 10 月 19 日の「苫小牧 CCS 実証試験に係わる課題検討会」において地震学等の専門家を含む委員の間で、①同地震による CO_2 漏洩がない、②CO_2 の地中貯留と本地震との関係を示唆するデータは確認されていない、との共通認識が得られた。

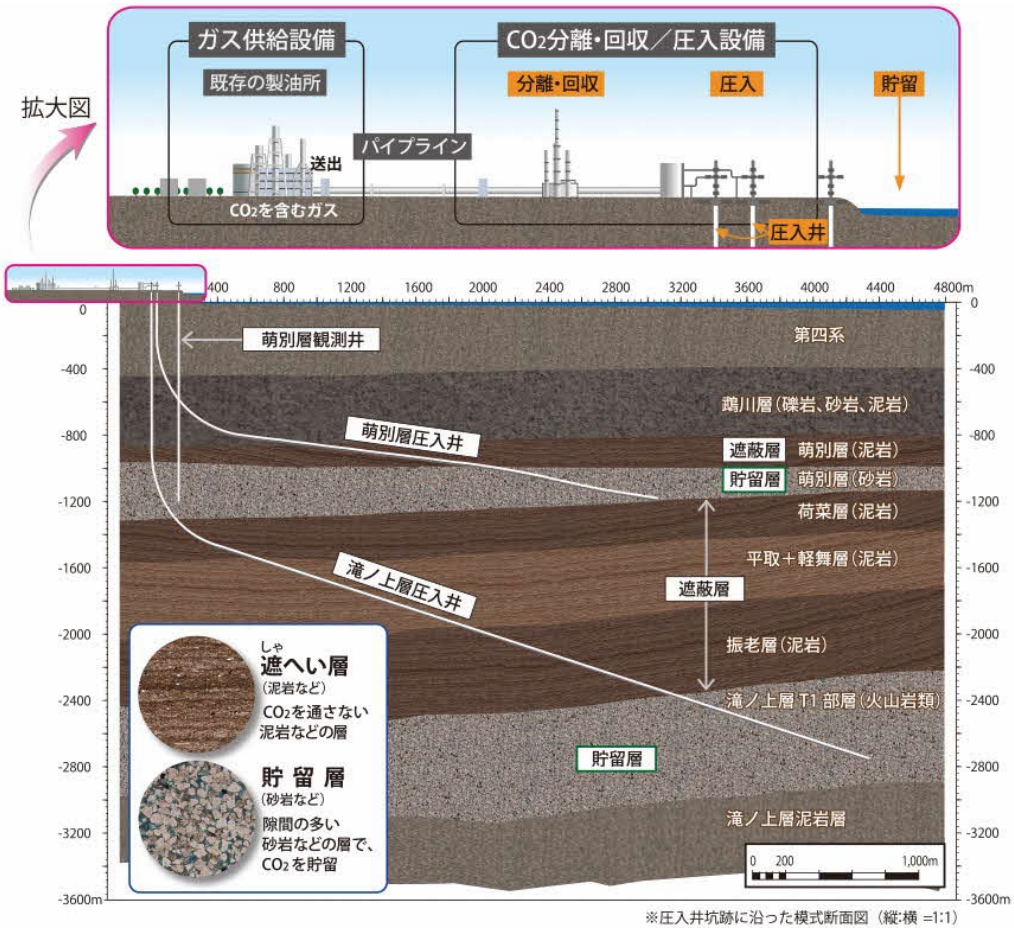


図 3.3.2-4　苫小牧市における CCS 大規模実証試験事業の概要 [8]

（出典：日本 CCS 調査ホームページ）

b) CO_2 輸送に関する実証試験

本実証試験は、液化 CO_2 船舶輸送技術を確立するために、CO_2 排出源から貯留地までの長距離船舶輸送の実証を行うものである [6]（図 3.3.2-5）。CO_2 排出源（輸送元）を京都府舞鶴市の舞鶴発電所（関西電力、石炭火力）とし、貯留地想定（輸送先）を北海道苫小牧市とした約 1,000km の長距離船舶輸送試験で、液化 CO_2 輸送船の建造を 2023 年度に、輸

送を 2024 年度から開始する計画である。

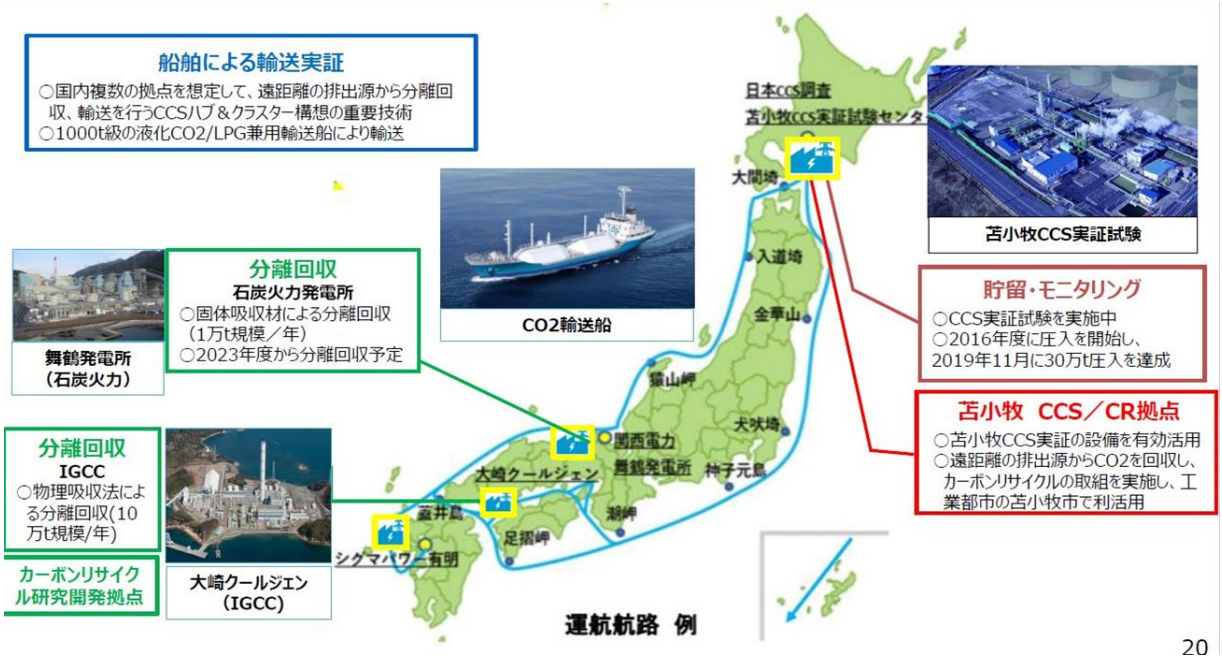


図 3.3.2-5　CO_2 輸送に関する実証試験の概要 [9]（出典：経済産業省，2022）

c) CO_2 貯留技術の研究開発事業

CO_2 地中貯留は、海外も含めれば実用化から事業化のフェーズにあり、事業化に向けたリスク低減や経済性向上が今後の課題である。「安全な CCS 実施のための CO_2 貯留技術の研究開発」[6]では、CO_2 貯留技術に関して、安全性を担保しつつ、低コストかつ実用規模の安全管理技術の確立を目指した研究開発を実施しており、光ファイバーによる CO_2 挙動等の計測技術や貯留層管理システムの開発、SLO（Social License to Operate）という社会的受容性を評価するツールの開発、さらには坑井封鎖実用化試験などを実施している。

②海外実証事業

a) Quest

カナダのアルバータ州 Quest における CO_2 地中貯留プロジェクトで、年間 100 万 t の圧入を計画して 2015 年 11 月に圧入を開始し、2020 年には計画通り累計 500 万 t の圧入を達成している [10]。オイルサンド改質による合成原油製造用の水素製造プラントから化学吸収法（アミン）で CO_2 を回収し、陸上パイプラインで 64km 輸送した後に地下約 2,300m 帯水層に CO_2 を圧入して貯留している。圧入井は当初 2 本で開始し、2018 年 10 月 19 日以降は現在まで 3 本の圧入井で圧入を継続している。実証状況は Web サイトで公開されており、CO_2 圧入量や圧力変化等のデータを閲覧することができる。

b) Petra Nova

米国テキサス州における石炭火力発電所の燃焼後 CO_2 回収による大規模 EOR プロジェ

クトであり、発電所の大規模燃焼後 CO_2 回収はカナダの Boundary Dam に続き 2 例目である。年間 140 万 t の CO_2 を EOR として圧入する計画として 2016 年 12 月に運転を開始した [9]。W.A.Parish 発電所 8 号機の燃焼後排ガスから化学吸収法（アミン）で CO_2 を回収し、陸上パイプラインで 130km 輸送した後に地下 1,640～2,066m のウェスト・ランチ油田の貯留層に CO_2 を圧入して貯留する。経済性の悪化により 2020 年 6 月に稼働を中断したが、今後運転再開を目指していると報じられている。

c) Gorgon

豪州の西オーストラリア州 Barrow 島における世界最大級の LNG プロジェクトでの CO_2 圧入プロジェクトであり、年間 340～400 万 t の CO_2 圧入を計画している [9]。LNG を産出する Gorgon ガス田からのガス処理の一環として化学吸収法（アミン）で CO_2 を回収し、Barrow 島の地下約 2,300m の帯水層（深部塩水層）に圧入し貯留するものである。圧入井は 9 本掘削され、2019 年 8 月から CO_2 の圧入が開始された。2019 年度の年次レポート [11]によれば、2019 年度（2019 年 7 月～2020 年 6 月）は約 250 万 t の圧入に成功したとされる。

③海外のハブ&クラスター構想

海外では、操業段階または開発段階の数多くの CCS ハブ&クラスター構想がある（図 3.3.2-6）。規模の経済性により CO_2 の 1 トン当たりの CCS コスト低減を図るもので、複数施設の CO_2 排出源（クラスター）から CO_2 を集めて処理施設（ハブ）でまとめて圧縮・液化等を行い、貯留サイトへ輸送する。CO_2 処理施設、輸送施設（パイプライン・船舶等）、貯留サイトを集約することにより CCS のトータルコストの低減を目指す。

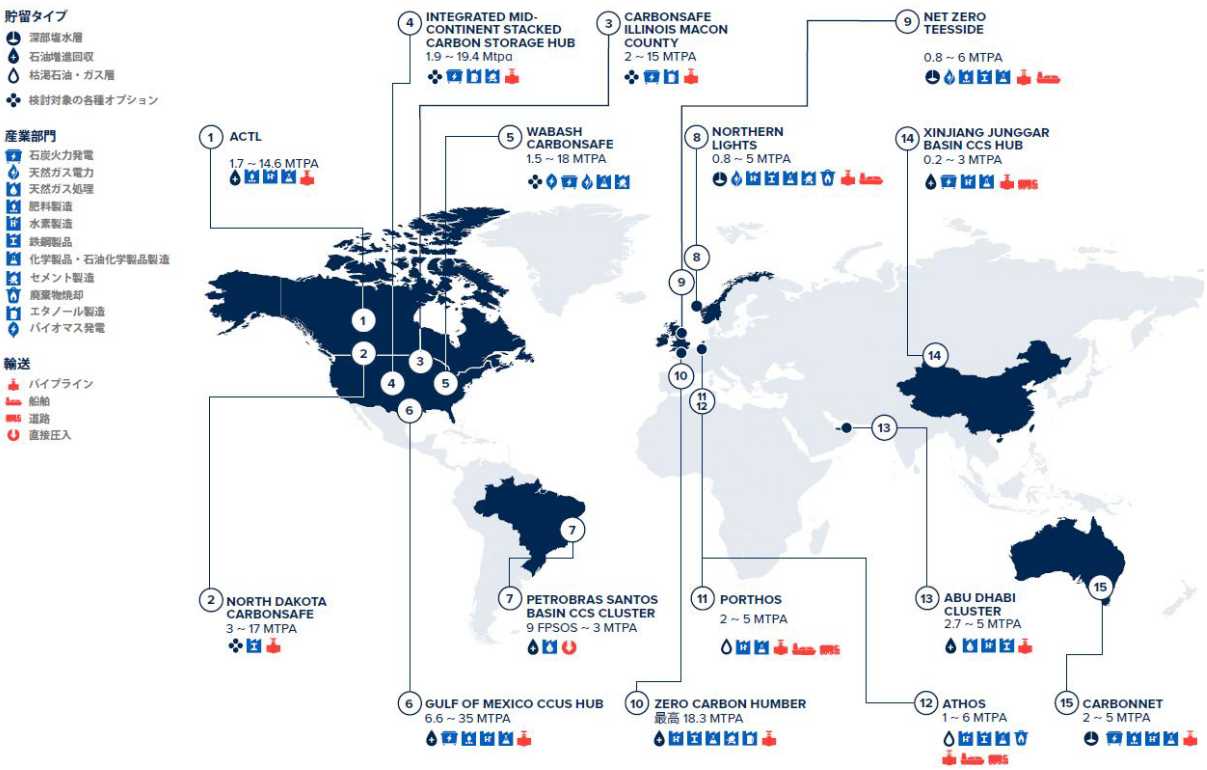


図 3.3.2-6　世界の CCS ハブ&クラスター構想 [12]（出典：Global CCS Institute, 2020）

a）米国・メキシコ湾における CCS ハブ構想

米国エクソンモービル社による石油化学、製造、発電設備事業から排出される CO_2 を回収し、メキシコ湾海底下の地層中に貯留する構想で、CO_2 圧入量は 2030 年までに年間 5,000 万 t、2040 年までに年間 1 億 t を想定している [9]。

b）ノルウェー・Longship プロジェクト

セメント工場、廃棄物燃焼施設から回収した CO_2 を船舶輸送し、陸上ターミナルに中間貯蔵した後、海底パイプラインで北海海底下の地層中に圧入し貯留するプロジェクトである（図 3.3.2-7）。CO_2 はノルウェー、スウェーデン、イギリス、ドイツ、デンマーク等の各国から集め、年間 CO_2 圧入量は 150 万 t から 500 万 t とする計画で、2024 年から稼働予定としている [9]。

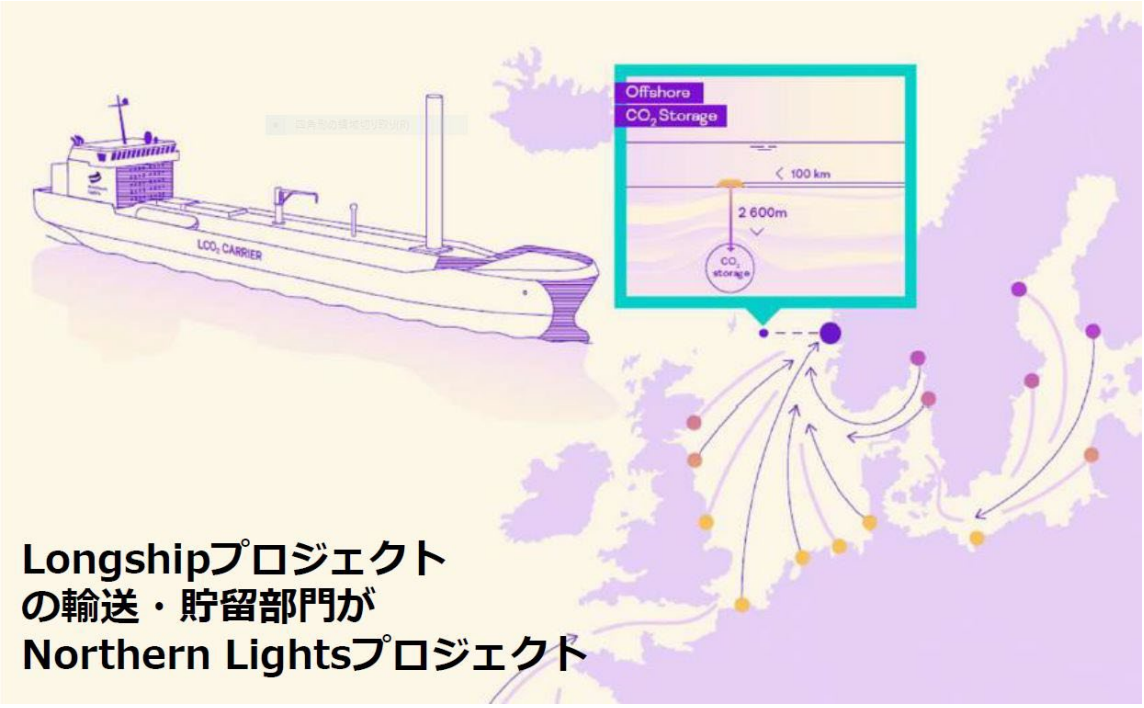


図 3.3.2-7　Longship プロジェクトの構想 [9]（出典：経済産業省，2022）

c) 英国・CCUS クラスター構想

英国内で 2020 年代半ばまでに 2 箇所で CCUS クラスターを、2030 年までにさらに 2 箇所で CCUS クラスターを展開する構想である。年間 CO_2 圧入量は、East Coast クラスターで 2,700 万 t、Hynet クラスターで 1,000 万 t、Scottish クラスターで 700 万 t を想定しており [9]、非常に大規模である。

(5) コスト試算事例

既往調査報告書以降に検討されたコスト試算事例として、経済産業省による発電コスト検証 WG における試算、CCS 長期ロードマップ検討会による試算がある。

①発電コスト検証 WG（経済産業省、2021 年）

エネルギー基本計画の見直しを検討するにあたって、検討の参考となる各電源の発電コスト等について試算を実施するため、基本政策分科会の下に発電コスト検証ワーキンググループが 2021 年 3 月設置され、2021 年 8 月に試算が取りまとめられた [13]。火力発電に係るコストとして CCS コストは試算され、その一例を図 3.3.2-8 に示す。

②CCS 長期ロードマップ検討会（経済産業省、2022 年）

第 2 回 CCS 長期ロードマップ検討会（2022 年 2 月）において CCS 付き火力のコストを試算した [14]。結果一例を図 3.3.2-9 に示す。

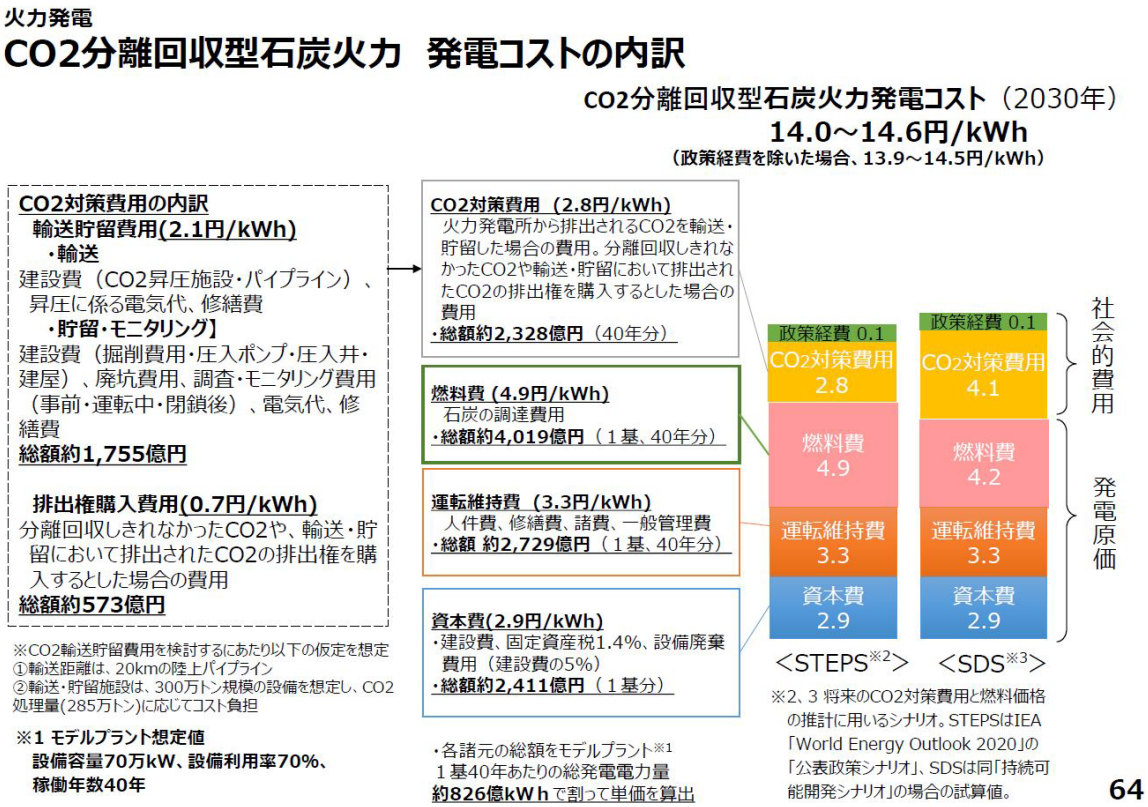


図 3.3.2-8　発電コスト検証 WG による発電コスト内訳（CO2 分離回収型石炭火力）[13]

（出典：経済産業省，2021）

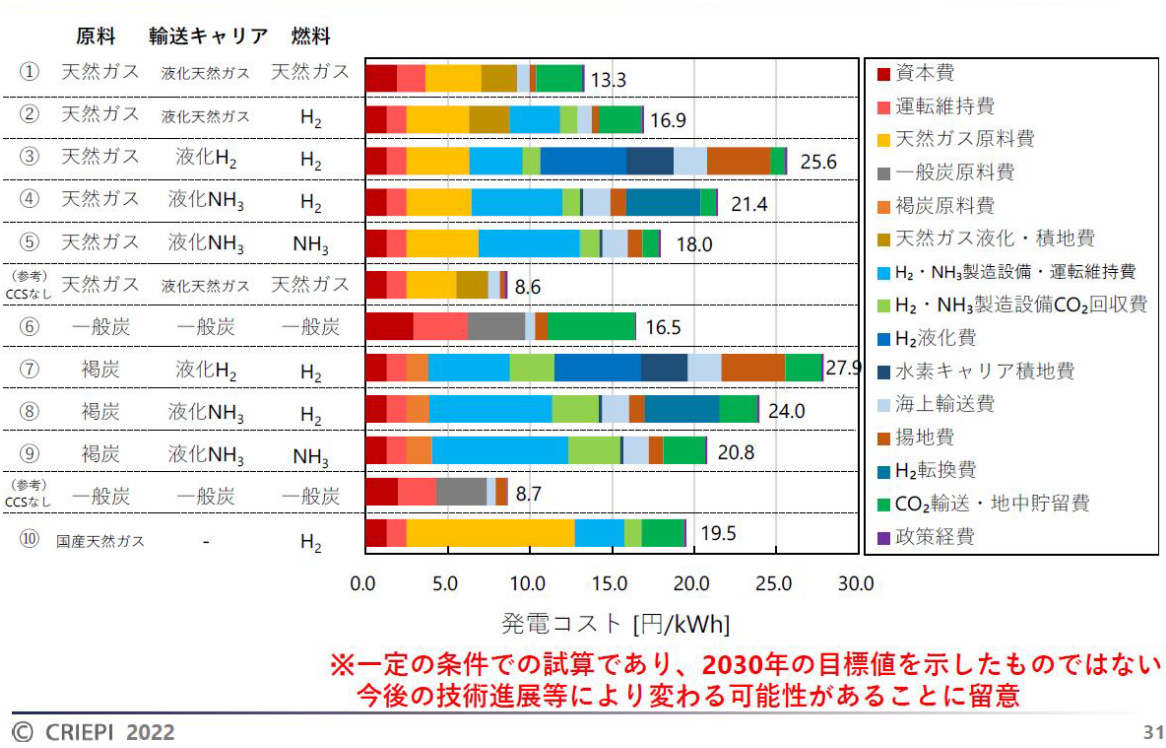


図 3.3.2-9　第 2 回 CCS 長期ロードマップ検討会（LNG・石炭火力のコスト試算）[14]

（出典：経済産業省，2022）

③CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキング（経済産業省、2022 年）

第 3 回 CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキング（2022 年 10 月）において、Quest プロジェクトの CCS ライフサイクル費用を紹介するとともに、国内での CCS バリュエーションコストを試算した[15]。結果概要を表 3.3.2-2 及び表 3.3.2-3 に示す。

表 3.3.2-2　第 3 回 CCS 事業コスト・実施スキーム WG（石炭燃焼排ガスのコスト試算）[15]

（出典：経済産業省，2022）

- **石炭燃焼排ガス（CO2濃度12%～13%程度）**からのCO2分離回収、パイプライン輸送、貯留するケースでの試算例。
- CCSライフサイクルに要する総費用は、約4,100億円～1兆1,300億円程度となった。

区分（年数は仮定）	計画			活動			閉鎖	備考
	構想	評価	精査	建設（4～5年）	操業（40年）	閉鎖（1～3年）	閉鎖後管理（20年）	
	（3～6年）							
分離回収 100万tCO2/年 300万tCO2/年	30～58億円 ※建設費の10%			300～580億円	1,680～4,720億円 （42～118億円/年）	15～29億円 ※建設費の5%		2,025 ～5,387億円
パイプライン輸送 50km 100km	21～53億円 ※建設費の10%			昇圧： 70～140億円	520～1,440億円 （13～36億円/年）	11～27億円 ※建設費の5%		922 ～2,530億円
				PL： 140～390億円	160～480億円 （4～12億円/年）			
貯留 陸上坑口 海上坑口（着底）	195億円 ※探査範囲1000km2 ※試錐2本（海洋）		80 ～130億円	280～980億円 （20年で更新）	圧入： 160～880億円 （4～22億円/年）	廃坑費用： 16～200億円	モニタリング： 90～270億円 （5～14億円/年）	1,141 ～3,345億円
					モニタリング： 320～690億円 （8～18億円/年）			
その他 （PA等）	3～6億円			4～5億円	40億円 （1億円/年）	1～3億円	20億円	68 ～74億円
合計 （その他含まず）	326～436億円			790～2,090億円	2,840～8,210億円 （71～205億円/年）	42～256億円	90～270億円	4,088億円 ～1兆1,262億円

本試算は既往文献（H20～H24NEDOゼロエミPJ等）にあるコストデータを元にした試算例である。土地代、土地利用、土地整備、地下性状、その他の補償費等は一切考慮していない。

表 3.3.2-3　第 3 回 CCS 事業コスト・実施スキーム WG（LNG 燃焼排ガスのコスト試算）[15]

（出典：経済産業省，2022）

- **LNG燃焼排ガス（CO2濃度3%～4%程度）**からのCO2分離回収、パイプライン輸送、貯留するケースでの試算例。
- CCSライフサイクルに要する費用は、約7,200億円～2兆円程度となった。

区分（年数は仮定）	計画			活動			閉鎖	備考
	構想	評価	精査	建設（4～5年）	操業（40年）	閉鎖（1～3年）	閉鎖後管理（20年）	
	（3～6年）							
分離回収 100万tCO2/年 300万tCO2/年	40～78億円 ※建設費の10%と仮定			400～780億円	4,680～1兆3,560億円 （117億円/年 ～339億円/年）	20～39億円 ※建設費の5%		5,140 ～1兆4,457億円
パイプライン輸送 50km 100km	21～53億円 ※建設費の10%と仮定			昇圧： 70～140億円	520～1,440億円 （13～36億円/年）	11～27億円 ※建設費の5%		922 ～2,530億円
				PL： 140～390億円	160～480億円 （4～12億円/年）			
貯留 陸上坑口 海上坑口（着底）	195億円 ※探査範囲1000km2 ※試錐2本（海洋）		80 ～130億円	280～980億円 （20年で更新）	圧入： 160～880億円 （4～22億円/年）	廃坑費用： 16～200億円	モニタリング： 90～270億円 （5～14億円/年）	1,141 ～3.345億円
					モニタリング： 320～690億円 （8～18億円/年）			
その他 （PA等）	3～6億円			4～5億円	40億円 （1億円/年）	1～3億円	20億円	68 ～74億円
合計 （その他含まず）	336～456億円			890 ～2,290億円	5,840～1兆7,050億円 （146～426億円/年）	47～266億円	90～270億円	7,203 ～2兆332億円

本試算は既往文献（H20～H24NEDOゼロエミPJ等）にあるコストデータを元にした試算例である。土地代、土地利用、土地整備、地下性状、その他の補償費等は一切考慮していない。

(6) CCS 社会実装における課題と対応

日本における CCS の社会実施における課題を考える上で、海外での CCS プロジェクトの中止事例の分析が参考になる（図 3.3.2-10）。中止の理由としては、事業コストや政策・法制度に係わる「資金不足」・「事業見通し難」・「政策の不透明性」・「法制度」の合計が 68%を占める [16]。

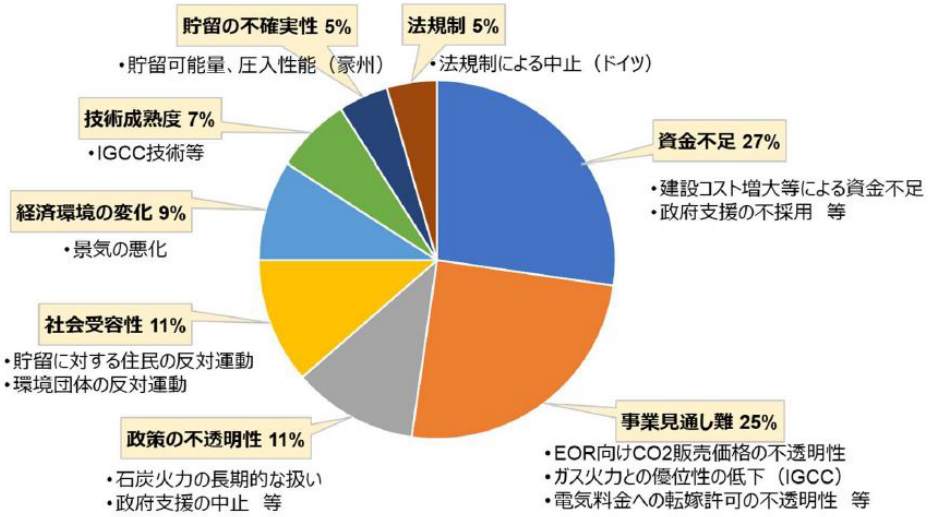


図 3.3.2-10　海外 CCS プロジェクトの主な中止理由（32 件）[16]

（出典：RITE, 2021）

①CCS 事業に係る制度的インセンティブ

欧米など CCS 先進国では、CCS 事業に対する政府支援として CAPEX・OPEX を通じた事業全体での補助率がほぼ 100%である。また、CCS 事業に対する支援を行っている全ての国において、CAPEX 支援と OPEX を含む稼働時支援を実施している。

スキーム			ﾉﾙｳｪｰ	カナダ・ｱﾙﾊﾞｰﾀ州	米国	豪州	英国	オランダ
CCS事業の規制法			石油・ガス関連事業法をベースにCCS事業を規制（米国の陸域は飲料水源保護法）					
支援対象となる貯留サイト			海域・帯水層	陸域・帯水層/枯渇ガス田	海域/陸域・帯水層/枯渇油田	陸域・帯水層/枯渇ガス田	海域・帯水層/枯渇ガス田	海域・枯渇ガス田
支援全体※の補助率（支援期間）※①CAPEX支援、②稼働時支援、③資金調達支援			87%＋α（10年）	100%（10年）	－（12年）	100%強（25年）	100%＋α（15年）	100%＋α（15年）
①CAPEX支援		直接補助金	○	○	○（検討中）	○	○	○（欧州委員会）
		投資減税			○	全ての国でプロジェクト初期段階でのCAPEX支援を実施		
②稼働時支援	OPEX支援	直接補助金	○＋ 輸送・貯留料無料	○	全ての国で稼働時での支援を実施（各国の既存制度と親和性の高い支援スキームを選択）			
	CO_2削減支援	CO_2貯留税額控除			○			
		排出ｸﾚｼﾞｯﾄ免除	○ または			○	○	○
		排出ｸﾚｼﾞｯﾄ付与	○	○		○		
		炭素税免除	○	○				
	収益支援	固定価格買取					○	○
③資金調達支援		公的出資						
		低金利融資			○（検討中）			
		債務保証			○			

（出典）第3回 CCS長期ロードマップ検討会、資料6を加工　26

図 3.3.2-11　CCS 事業に対する他国政府の支援事例 [9]（出典：経済産業省, 2022）

②CCS 事業に係る法制度の課題等

現行の法制度の主な課題として、CCS 長期ロードマップ検討会の中間とりまとめでは図 3.3.2-12 の通り整理し、これらの課題について最終とりまとめでは「CCS 事業法（仮称）のあり方について」として整理した。

課題①　事業者がCCSで地下を利用する権利の設定

CCS事業において事業者は、我が国の地下又は海底下に対して井戸を掘削し、地質構造への海水及びCO2の圧入を行う。**我が国の地下又は海底下については土地の所有権や鉱業法による鉱業権が及ぶ**ため、これら権利との**バッティング回避の観点から、新たに「CO2圧入貯留権」を設定**する必要があるのではないか。

課題②　事業者が負う法的責任の明確化

CCS事業を行う事業者は、**保安責任、民事責任、気候変動対応責任を問われる可能性**がある。他方で、これら事業者が負うべき**責任の範囲や期間（現在の海防法では事業者の無限責任）が不明確**であることから**事業リスクを評価することが難しく、事業者や金融機関によるCCS事業への投資判断の妨げ**となっているのではないか。

課題③　我が国の貯留層の適正な管理

これまでの調査により**我が国の排他的経済水域内でCCS適用の可能性のある地域が確認**され、今後、我が国周辺の海域においてCCSが商業的に開発される可能性が出てきていることから、**CCSの探査を許可制とするなど貯留層を適正に管理**し、我が国のCCS事業を円滑にする必要があるのではないか。

課題④　CO2の海外輸出に係るロンドン議定書の担保

ロンドン議定書について、**輸出先の国との合意又は取決めを条件にCO2の貯留を目的とした海外への輸出を可能とする改正が採択**されたが、発効要件（締約国の３分の２以上の批准書の寄託）が満たされずに未発効となっている。**「アジアCCUSネットワーク」における我が国のリーダーシップを発揮するため**、今後の発効に向けて、**国内法による担保が必要**となるのではないか。

15

図 3.3.2-12　現行の法制度の主な課題[9]（出典：経済産業省，2022）

参考文献

1) 二酸化炭素地中貯留技術研究組合ホームページ：CO_2 地中貯留技術事例集（01 基本計画）, https://www.co2choryu-kumiai.or.jp/co2/（2022/8 アクセス）

2) 土木学会（2017）：CO_2 輸送・貯留に関する技術動向と土木分野における課題

3) 経済産業省（2022）：第 1 回 CCS 長期ロードマップ検討会（2022/1/28），資料 4）CCS の事業化に向けた今後の論点整理

4) 経済産業省（2023）：CCS 長期ロードマップ検討会最終とりまとめ（2023/3/10）説明資料

5) 経済産業省（2023）：第 38 回分科会（2023/6/23） 参考資料 2 カーボンマネジメント小委員会の設置について

6) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ホームページ：CCUS 研究開発・実証関連事業，https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100141.html（2024/1 アクセス）

7) 経済産業省，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），日本 CCS 調査㈱（2020）：苫小牧における CCS 大規模実証試験 30 万トン圧入時点報告書（「統括報告書」）

8) 日本 CCS 調査株式会社ホームページ：苫小牧 CCS 大規模実証試験，https://www.japanccs.com/business/demonstration/index.php（2022/11 アクセス）

9) 経済産業省（2022）：CCS 長期ロードマップ検討会中間とりまとめ（2022/5/27）参考資料

10) Shell Canada Energy（2022）：Quest Carbon Capture and Storage Project ANNUAL SUMMARY REPORT ALBERTA DEPARTMENT OF ENERGY: 2021, 6-1_6-3

11) Chevron（2020）：Gorgon Project Carbon Dioxide Injection Project Low Emissions Technology Demonstration Fund Annual Report 1 July 2019 – 30 June 2020, 5_5

12) Global CCS Institute（2020）：世界の CCS の動向 2020 年版

13) 経済産業省（2021）：基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告

14) 経済産業省（2022）：第 2 回 CCS 長期ロードマップ検討会（2022/2/24），資料 3）水素・アンモニア発電コスト及び CCS 付き火力発電コスト試算結果

15) 経済産業省（2022）：第 3 回 CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキング（2022/10/31），資料 4）CCS バリュエーションコスト

16) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）（2021）：令和 2 年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費（我が国における CCS 事業化に向けた制度設計や事業環境整備に関する調査事業）調査報告書

3.3.3 ブルーカーボン

(1) ブルーカーボンとは

① ブルーカーボンの定義

2009 年 10 月、国連環境計画（UNEP）の報告書において、藻場・浅場等の海洋生態系に取り込まれた（captured）炭素が「ブルーカーボン」と命名され、地球温暖化対策としての吸収源の新しい選択肢として提示され、世界的に注目されている。

② ブルーカーボン生態系

炭素の蓄積作用を有する海洋生態系をブルーカーボン生態系といい、世界各国で地球温暖化への対応が本格化する中、ブルーカーボン生態系による CO_2 吸収が注目され、活用するための取組が行われている。対象となる主な海洋生態系を図 3.3.3-1 に示す。

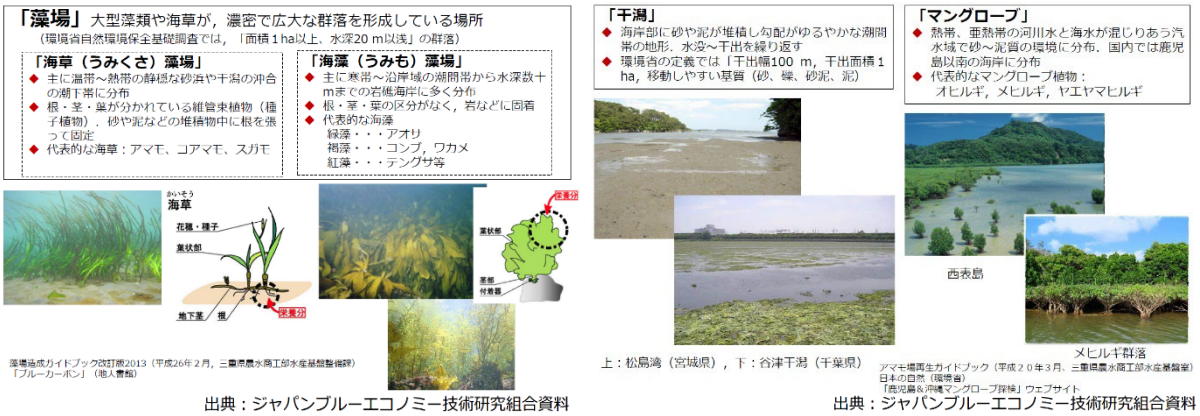


図 3.3.3-1　対象となる海洋生態系（ブルーカーボン生態系）[1)]

（出典：国土交通省ホームページ）

③ ブルーカーボンのメカニズム

ブルーカーボン生態系のメカニズムを図 3.3.3-2 に示す。

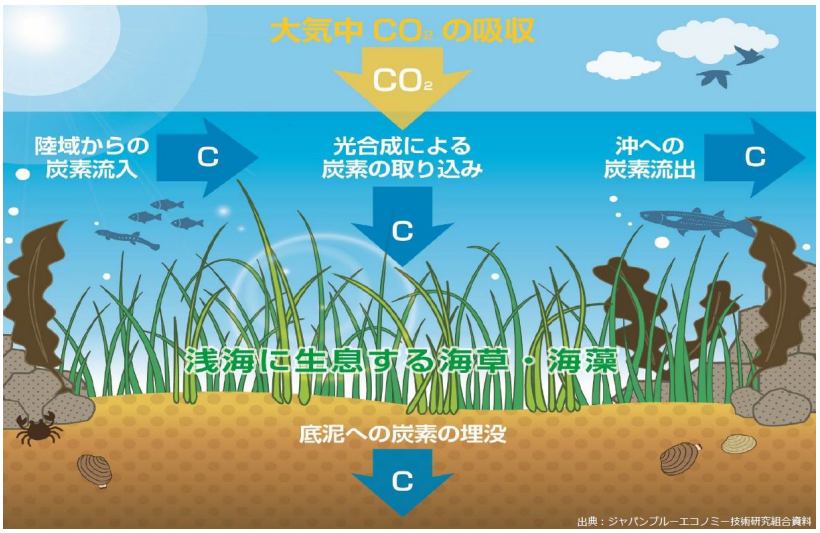


図 3.3.3-2　ブルーカーボンのメカニズム [1)]（出典：国土交通省ホームページ）

また、それぞれブルーカーボン生態系によって、炭素貯留のメカニズムが異なる。図 3.3.3-3 に それぞれのブルーカーボン生態系の違いを示す。

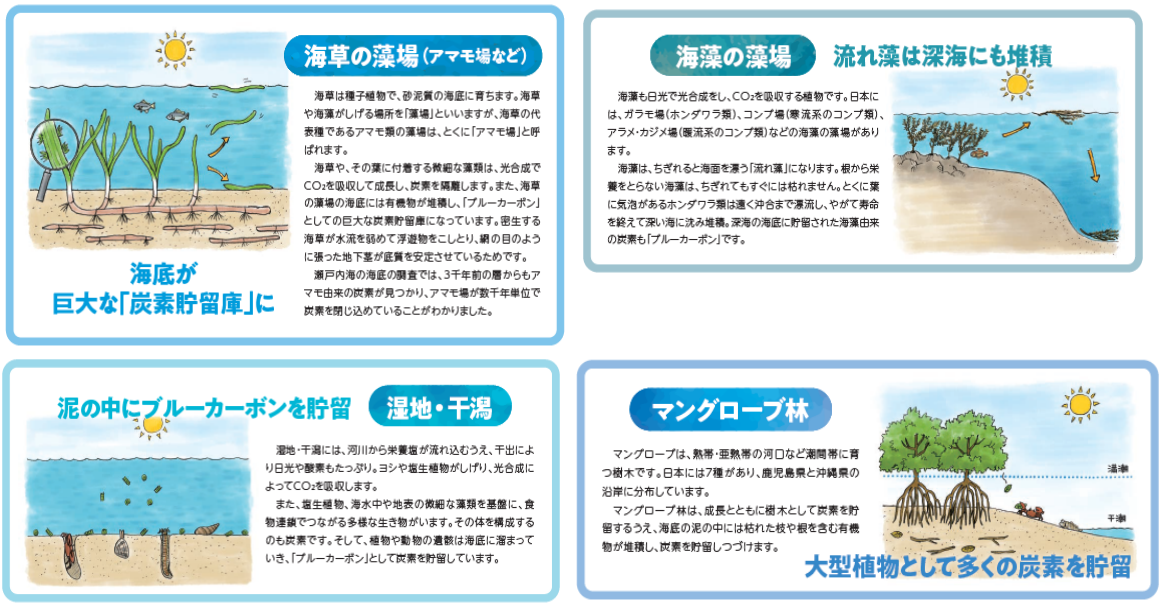
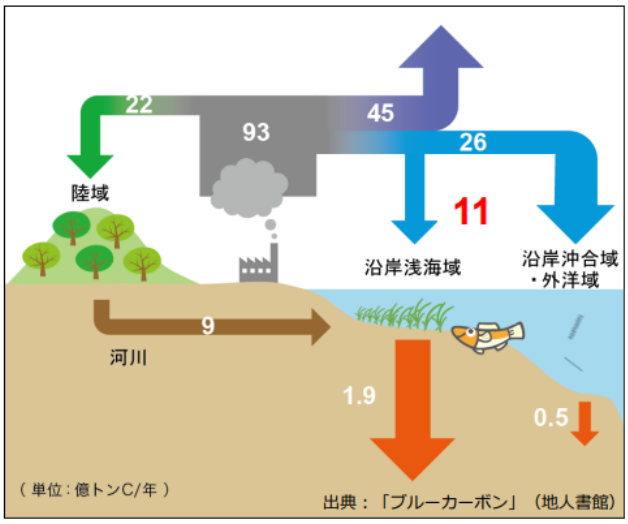


図 3.3.3-3　対象となる海洋生態系（ブルーカーボン生態系）[2)]
（出典：国土交通省ホームページ）

④ ブルーカーボンによる CO_2 吸収の全体イメージ

人間の活動により排出された CO_2 のうち、炭素（C）換算で、海洋に 26 億 t-C/年（全体の 28%）が吸収される。そのうち、11 億 t-C/年（全体の 12%）が、日光が届き光合成できる浅い海域で吸収され、さらに、植物由来の CO_2 が海底の堆積物中に 2.4 億 t-C/年（全体の 3%）貯留される。全体的イメージを図 3.3.3-4 に示す。



排出された二酸化炭素のうち、一部が陸域（22億t-C/年）や海洋（26億t-C/年）に吸収

出典：ジャパンブルーエコノミー技術研究組合資料

図 3.3.3-4 炭素循環のイメージ [1)]（出典：国土交通省ホームページ）

(2) ブルーカーボンによる CO_2 吸収効果

① ブルーカーボンによる CO_2 吸収量の算定について

2022 年 3 月、環境省 地球環境局では、ブルーカーボンの算定について、以下の検討課題を示している [3)]。2013 年に IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change、気候変動に関する政府間パネル）で採択された湿地ガイドラインは、泥炭地・沿岸湿地・内陸の泥炭地以外の湿地の算定方法について、2006 年 IPCC ガイドラインに追加的なガイダンスを提供している。また、UNFCCC（国連気候変動枠組条約）下での湿地ガイドラインは、現行のインベントリ作成及びパリ協定下のインベントリ作成においても任意適用ルールとなっている。現在、我が国でも算定に向けた取り組みを実施している。

② 世界全体のポテンシャル

2019 年に公表された、IPCC の「海洋・雪氷圏特別報告書」において、世界全体のブルーカーボンの気候変動緩和ポテンシャルは、世界全体の温室効果ガス排出量の 0.5%を相殺する程度と評価されている。また、2018 年の世界全体の温室効果ガス排出量は、CO_2 トン換算で 553 億 tCO_2 であり、世界全体のブルーカーボンは 2 億 8 千万 tCO_2 弱の気候変動緩和ポテンシャルがあることになる [3)]。

③ 日本におけるブルーカーボンによる CO_2 吸収量の推計事例

2019 年 3 月土木学会論文集（海岸工学）で、桑江らは、浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計を発表している [4)]。図 3.3.3-5 にその結果を示す。

生態系		生態系の面積（活動量）		吸収係数[*1]		吸収量[*2]	
		（万ha）		平均値	上限値	平均値	上限値
				（トンCO_2/ha/年）		（万トンCO_2/年）	
海草藻場	アマモ場	6.2	[*3]	4.9	33.4	30	206
海藻藻場	ガラモ場	8.8	[*3]	2.7	5.1	24	45
	コンブ場	2.0	[*3]	10.3	36.0	21	73
	アラメ場	6.3	[*3]	4.2	7.9	26	50
	計	17.2				71	167
マングローブ		0.3	[*4]	68.5	68.5	18	18
干潟		4.7	[*4]	2.6	2.6	12	12
合計		28.3				132	404

[*1] 表-3 参照
[*2] 生態系の面積（活動量）×吸収係数
[*3] 文献値[13)]，調査年：2010年
[*4] 文献値[16)]，調査年：1995～1997年

図 3.3.3-5 浅海生態系による年間二酸化炭素吸収量の全国推計結果 [4)]

（出典：桑江ら，2019）

(3) ブルーカーボンに係る政策

① 温室効果ガスインベントリへの組み込み（海外）

2022 年 3 月、環境省 地球環境局では、各国におけるブルーカーボンの算定に向けた取り組みを紹介している [3)]。

熱帯・亜熱帯諸国では、森林生態系の一部にマングローブが含まれるため、湿地ガイドラインを適用せず、マングローブのバイオマス部分に森林と同様の算定式を当てはめて吸収量を計上している国が大半である。湿地ガイドラインを用いてブルーカーボンを算定し、インベントリに計上しているのは、豪州、米国の 2 か国のみとなっている。

パリ協定に基づく NDC（国が決定する貢献）において、多くの国がブルーカーボン／沿岸湿地生態系について言及しており、実際にインベントリへの組み込みが済んでいる国は 2 か国のみ [5)]であり、ブルーカーボンを通じた排出削減・吸収量の組み込みは、今後本格化していくと想定される。

② 日本におけるブルーカーボン算定に向けた取り組み（国交省、農水省、環境省）

2022 年 3 月、環境省 地球環境局では、我が国における各省庁の取組と算定の課題を示している [3)]。

a) 国土交通省港湾局:「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」

ｱ) 我が国のブルーカーボン生態系に関する、温室効果ガス排出量・吸収量の算定、クレジット制度、普及・啓発活動広報戦略等について、指針の検討、及び具体的な検討状況の情報交換を実施。

ｲ) マングローブ、湿地・干潟に関する温室効果ガス排出・吸収量の方法論、海草・海藻藻場のデータ収集・算定システム等の技術的検討をブルーカーボン研究会（事務局：みなと総合研究財団、港湾空港技術センター）とも連携し、検討会の下で進めている。

ｳ) 環境省、経済産業省を始めとする関係省庁もオブザーバーの立場で検討に参画。

b) 農林水産省 農林水産技術会議：農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究「脱炭素・環境対応プロジェクト農林水産分野における炭素吸収源対策技術の開発（ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発）

ｱ) 我が国の海草藻場、海藻藻場の炭素固定方法論に関係する、方法論開発、パラメータ開発、データ整備、具体的な緩和策の検討を実施。

ｲ) 令和 2～6 年度の 5 か年プロジェクト。

c) 環境省：「温室効果ガス排出量算定方法検討会 森林等の吸収源分科会」

ｱ) 国際的に我が国の温室効果ガスの排出量・吸収量報告（インベントリ）に組み込まれるために必要な具体的な課題の整理を関係省庁と連携して実施。

d) 我が国における算定の課題

ｱ) 算定に直接活用できる統計情報がないことから、既存の各種調査結果の活用方法、新たなデータベース開発及び今後の継続的なデータ更新体制の検討が必要。

ｲ) 海草・海藻の計算（対象定義：海草・海藻の現場外への流送(堆積、深海輸送、難分解)）は、IPCC ガイドラインの標準な算定方法を発展させた方法論のため、科学的な裏付けを集め、国際的に認められるロジック・エビデンスの収集・丁寧な説明が必要。

③ グリーン成長戦略におけるブルーカーボン（経産省ほか）

2021 年 6 月に発表された「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（内閣官房、経済産業省、内閣府、金融庁、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、環境省）[6]では、ブルーカーボンについて、4.重要分野における「実行計画」、(9)食料・農林水産業、②CO_2吸収・固定、＜現状の課題＞,P89 として、「ブルーカーボン（海洋生態系による炭素貯留）については、吸収源としての大きなポテンシャルが期待されており、2013 年に追加作成された IPCC 湿地ガイドラインには含まれていない海藻藻場を対象として、藻場タイプ別の CO_2吸収量評価手法の開発を進めている。また、藻場・干潟の造成・再生・保全技術の開発を実施中である。」と記載されている。

また、＜今後の取組＞,P91 として、「ブルーカーボンについては、2023 年度までに海藻藻場による CO_2の吸収・貯留量の計測方法を確立し、国連気候変動枠組条約等への反映を目指すとともに、産・官・学による藻場・干潟の造成・再生・保全の一層の取組を推進する。このことは、沿岸域での生物多様性の回復にも寄与する。また、新たな CO_2吸収源として、水素酸化細菌の大量培養技術等の革新的な技術開発を推進する。さらに、海藻や水素酸化細菌の商業利用を進めるとともに、カーボン・オフセット制度を利用した収益化を図り、CO_2吸収を自律的に推進する。」と記載されている。図 3.3.3-6 にグリーン成長戦略でのブルーカーボンの工程表を示す。

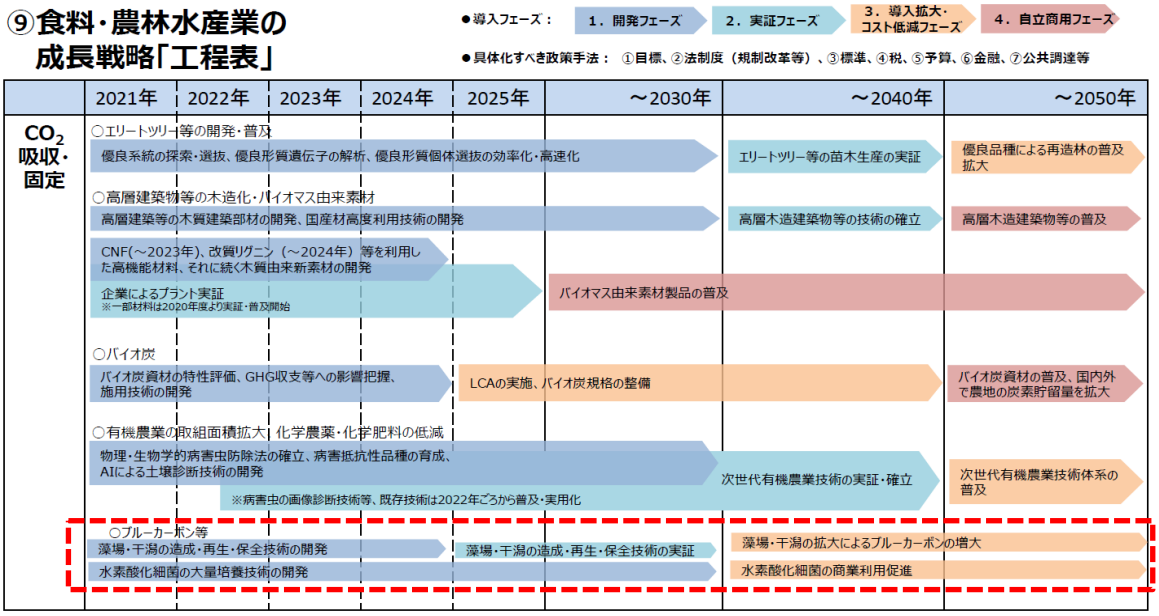


図 3.3.3-6 グリーン成長戦略でのブルーカーボンの工程表[6]（済産業省，2021）

(4) ブルーカーボンの適用事例

① ブルーカーボン・オフセット・クレジット制度の試行：「J ブルークレジット」

国土交通省 港湾局では、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、ブルーカーボン生態系を活用した吸収源の拡大を図るため、藻場の保全活動等の実施者（NPO,市民団体等）により創出された CO_2 吸収量をクレジットとして認証し、 CO_2 削減を図る企業・団体等とクレジット取引を行う「ブルーカーボン・オフセット・クレジット制度」※1 の構築に向けた試行を行っている [7]。（※1 藻場の保全活動等を行う NPO・市民団体等により創出された CO_2 吸収量をクレジットとし、CO_2 削減を図る企業・団体等との間でクレジット取引を行うこと。）

図 3.3.3-7 に、ブルーカーボン・オフセット・クレジット制度の試行イメージを示す。

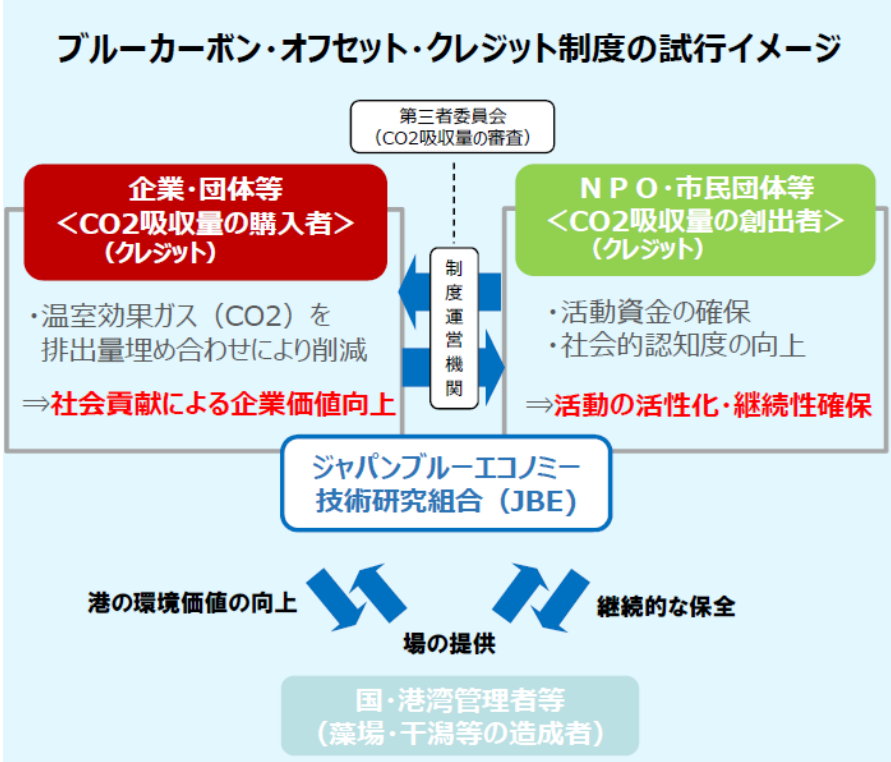


図 3.3.3-7 ブルーカーボン・オフセット・クレジット制度の試行イメージ [7]

（出典：国土交通省，2022）

② J ブルークレジットの認証事例

2021 年 3 月、横浜港、神戸港、徳山下松港及び北九州港において、NPO 等が藻場や干潟の保全活動により創出した CO_2 吸収量について、企業等との間で試行的にクレジット取引されることとなった。図 3.3.3-8 に、それぞれの事例制度の試行を示す。

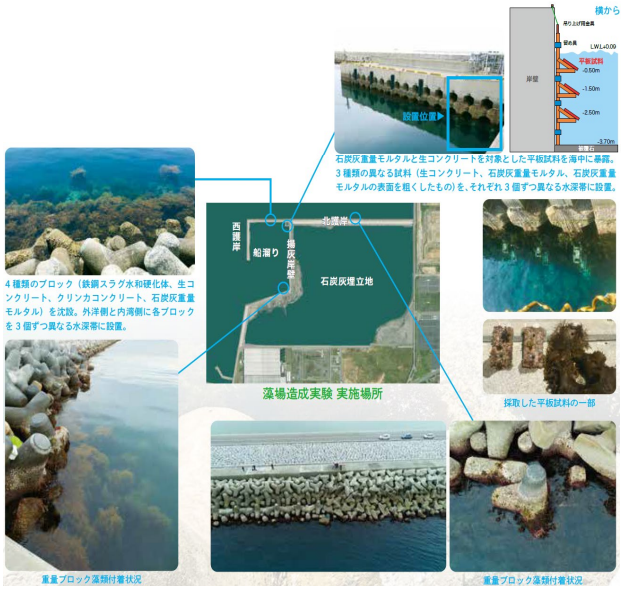
図 3.3.3-8 ブルーカーボン・オフセット・クレジット制度の認証事例 [7)]

（出典：国土交通省，2022）

(5) ブルーカーボンにおける土木技術の活用

① 護岸ブロックを用いた藻場造成によるブルーカーボン認証事例

図 3.3.3-9 に、J-Power 若松総合事業所周辺護岸に設置したブロックによる藻場造成プロジェクトの事例を示す。

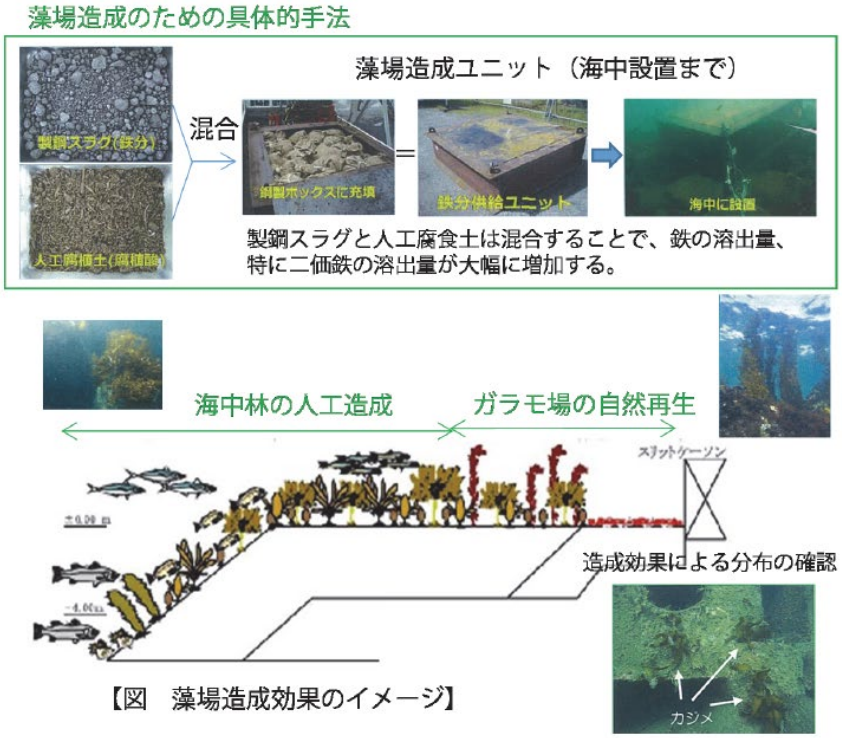


【港湾空港技術研究所提供】

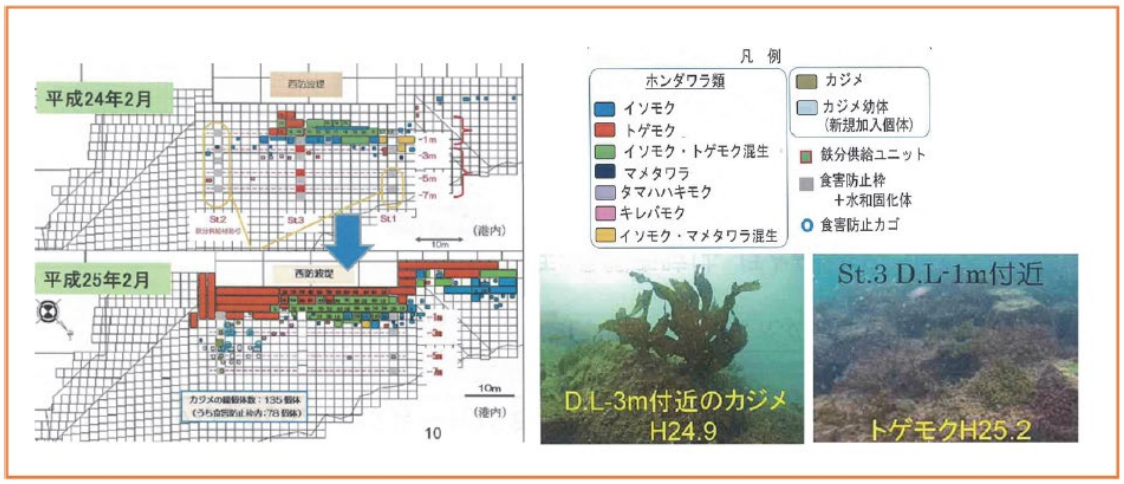
図 3.3.3-9 J-Power 若松総合事業所周辺護岸に設置したブロックによる藻場造成プロジェクトの事例 [8)]（出典：港湾航空技術研究所，2021）

② 高知県須崎港の湾口防波堤を活用した藻場造成

須崎港では、2000 年頃から水温上昇や食害により海藻が減少する「磯焼け」現象の発生が確認されており、この対策として、整備が進められる湾口防波堤を活用した藻場造成について検討が開始され、平成 22 年から 24 年には西防波堤で実証実験が行われた。設置後のモニタリングでは、防波堤周辺に海藻の分布が見られ、環境の改善に効果が見受けられた。将来的には東防波堤を含めたエリアへの実証実験拡大を目指している。また、平成 27 年からは、防波堤の粘り強い構造を利用する鉄鋼スラグを活用した環境改善・創造方策についての検討も進められている。これらの取組による効果として、藻場の回復を通した生物多様性の創生、豊かな漁場の形成、CO_2 削減による温暖化防止への寄与などが期待される[9]。



【図　藻場造成効果のイメージ】

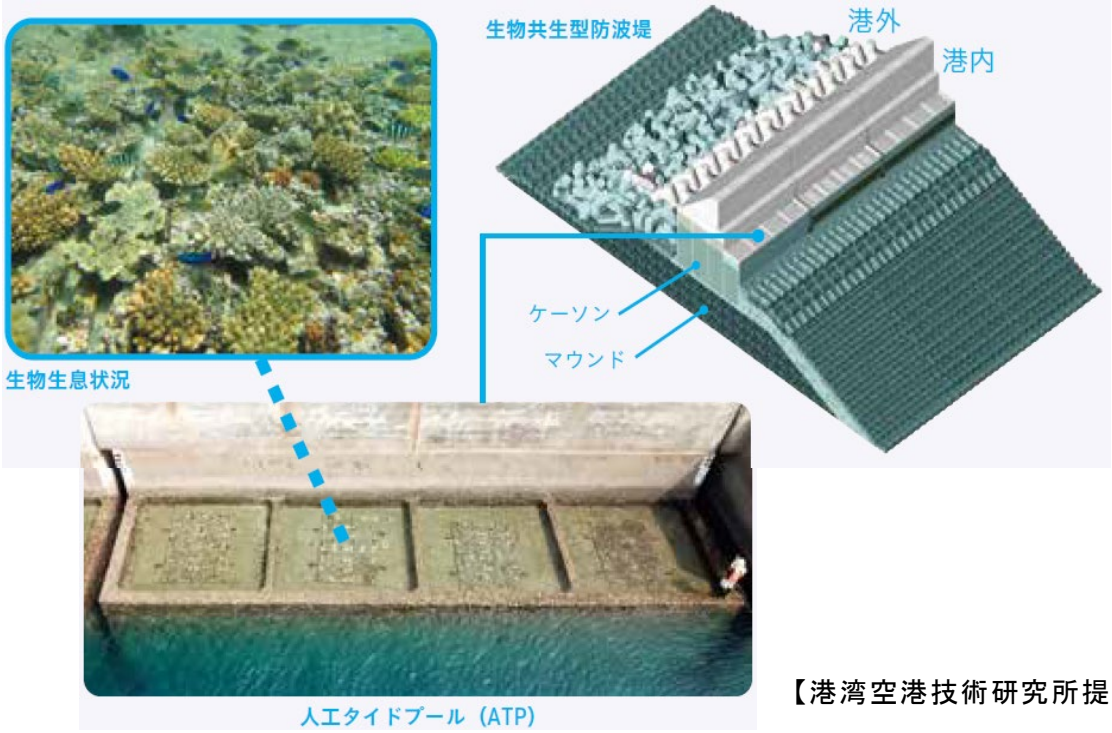


藻場造成実験後のモニタリング

図 3.3.3-10 藻場造成のイメージ[9]（出典：高知県・須崎市，2016）

③ 生物共生型防波堤のサンゴ着床効果

30 年以上前から那覇港の防波堤には自然と同等以上のサンゴの着生が確認されていた。その観測調査をもとに、沖縄県浦添第一防波堤の北側延伸区間が生物共生型防波堤として整備された。港内部に設けられた人工タイドプール(ATP)における費用対サンゴ着生効果が高く、より有効な手法であることを確認した[8) 10)]。



【港湾空港技術研究所提供】

図 3.3.3-11 生物共生型防波堤及び人工タイドプール(ATP)[8)]
（出典：港湾航空技術研究所，2021）

④ 生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドライン

2014 年 7 月に、国土交通省 港湾局は、港湾局で策定した生物共生に係る各種マニュアルや、全国各港湾で実施されている事例、実証実験の結果を踏まえ、整備に必要な考え方や技術的事項・効果等について整理・取りまとめ、公表した[11)]。

その中で、第 I 部 生物共生型港湾構造物の整備促進に向けて、（1）施設の利用段階でのメリット、④ CO_2 排出量取引への利用 に、「国内におけるプロジェクトにより、実現された温室効果ガス排出削減・吸収量をクレジットとして認証する制度として、オフセット・クレジット制度がある。この制度の適用を受けるためには生物共生型港湾構造物による炭素固定量の算出方法を確立する必要がある。海の生態系による炭素固定（ブルーカーボン）については研究段階ではあるが、ブルーカーボンの算出方法が確立できれば、カーボン･オフセットのプロジェクトの一つとして申請することが可能であると考えられる。」と記載している。

また、第Ⅲ部 生物共生型港湾構造物に関する技術、3.1 効果の整理の考え方、（1）

生物共生型港湾構造物の整備により期待される効果 に、「干潟や藻場に生息する海藻類や海草類や微細藻類は、太陽の光を得て光合成を行い、水中の CO_2 を吸収して酸素を放出する役割を担っている。生物共生型港湾構造物の整備により、海藻類や海草類が繁茂し、微細藻類が生息することで、海水へ溶け込んだ二酸化炭素を炭素化合物として留めておくことが可能となり、これは大気中の二酸化炭素を削減することにもつながると考えられる。」と記載している。

第Ⅱ部 生物共生型港湾構造物に関する技術、2．生物共生型港湾構造物の定義と分類を図 3.3.3-12 に示す。

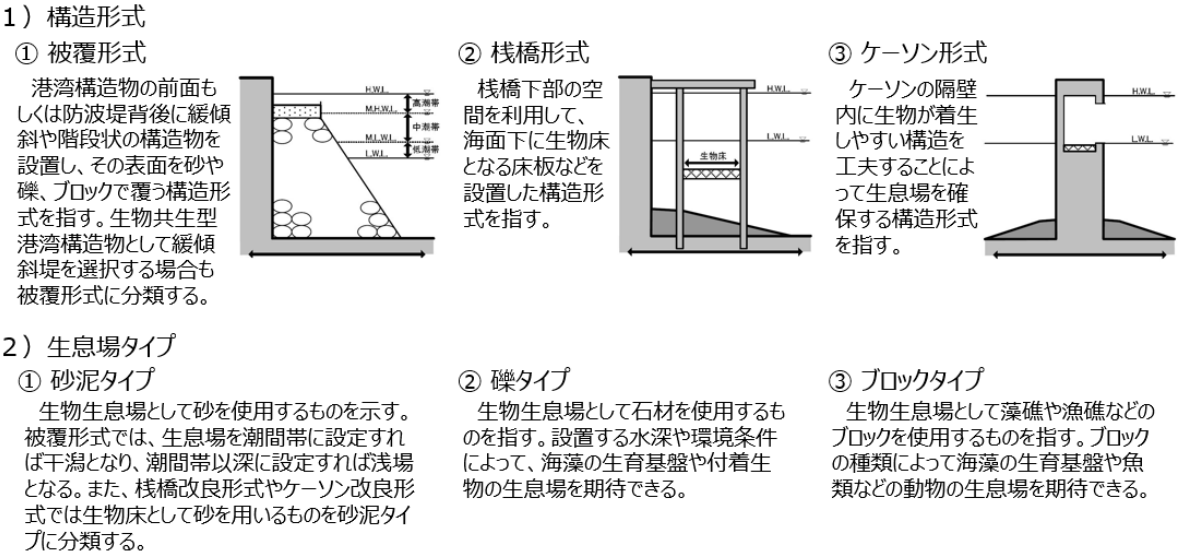


図 3.3.3-12 生物共生型港湾構造物の定義と分類[11]（出典：国土交通省，2014）

⑤ 釧路港島防波堤背後盛土における藻場造成

生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドラインでは、生物共生型港湾構造物の先行事例の一つとして、釧路港の防波堤における藻場の造成を示している。

北原らは、2008 年に寒地土木研究所月報で、釧路港島防波堤背後盛土実証試験区間における藻場繁茂調査及び物理量調査にて、下記事項が明らかになったと発表している[12]。

1) ナガコンブを主体とする良好な藻場が形成されていること
2) 藻場は珪藻を主体とするものからナガコンブを主体とするものへ遷移したこと
3) 光量子量は春季から夏季にかけて光合成に必要な量が存在していること
4) 海藻着床基盤上に堆積した浮遊砂は流れによって払拭されていること

また、国土交通省 北海道開発局は 2022 年 3 月に下記内容を報道発表している[13]。図 3.3.3-14 に、釧路港島防波堤における背後盛土による浅場の造成と藻場の生育状況を示す。

・北海道港湾のブルーカーボン定量化検討会を開催し、浅場の試験区間 3,600m² において、実際に生息した藻場を対象に、海藻類による CO_2 貯留、いわゆるブルーカーボンについて有識者による検討を実施した。

・検討の結果、少なくとも年間約 0.53kg/m²、試験区間全体で約 1.9t 程度の CO_2 貯留効果があると試算した。また、森林の面積と CO_2 吸収量から単純に計算される単位面積当たりの吸収量と比較すると、この藻場では 2.4 倍の効果があると推計※2 した。（※2「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2021」を参考に、2019 年度森林面積と 2019 年度の森林における CO_2 吸収量から単位面積当たりの吸収量を推計し、釧路港防波堤の藻場のものと比較）

・本プロジェクトは、将来 43,200m² の浅場の整備計画があり、完成すると単純計算で年間 22.9t 程度の CO_2 貯留が期待でき、104,000m² 程度の森林に相当する。

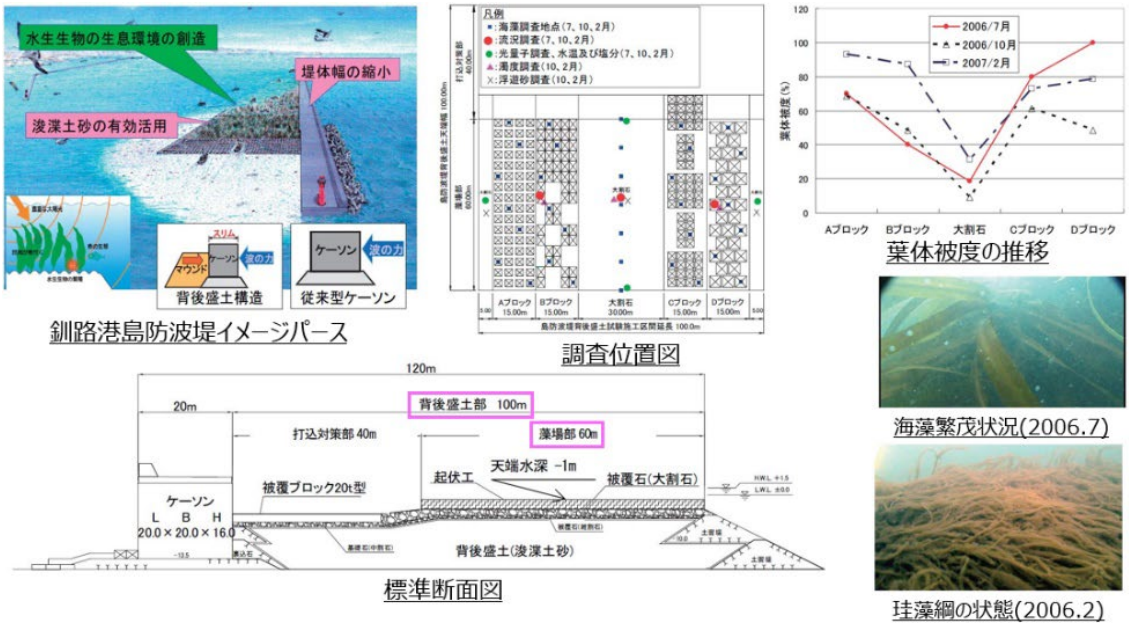


図 3.3.3-13 釧路港島防波堤背後盛土上の物理環境と藻場形成に関する研究 [12)]

（出典：北原ら，2008）

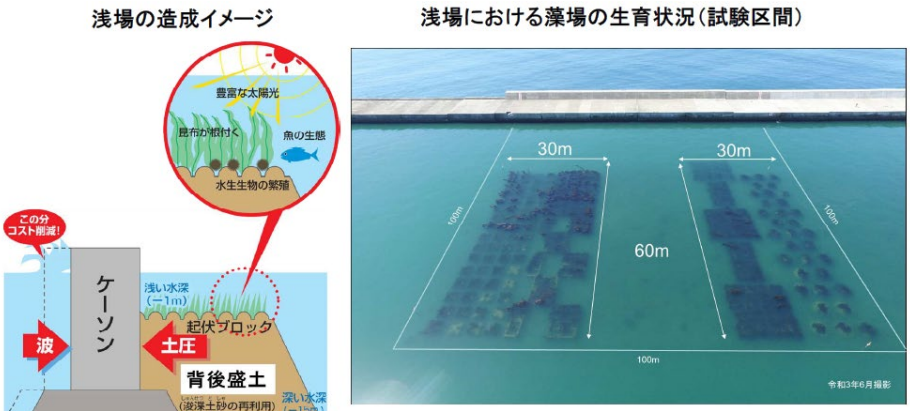


図 3.3.3-14 釧路港島防波堤における背後盛土による浅場の造成と藻場の生育状況 [13)]

（出典：国土交通省，2022）

参考文献

1) 国土交通省ホームページ：ブルーカーボンとは,
https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001394943.pdf （2022/8 アクセス）
2) 国土交通省ホームページ：海の森 ブルーカーボン（パンフレット）,
https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001616134.pdf （2022/8 アクセス）
3) 環境省（2022）：ブルーカーボンについて（地球環境局、2022 年 3 月）
4) 桑江ら（2019）：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計，土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.75, No.1, 10-20
5) 藤井、佐藤（2020）： UNFCCC 下のブルーカーボンに掛かる現状と課題，海洋政策研究(14):89-109
6) 経済産業省（2021）：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
7) 国土交通省（2022）：脱炭素社旗の実現に向けたブルーカーボン・オフセット・クレジット制度の試行について～J ブルークレジット証書交付式の開催について～
8) 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所（2021）：PARI 世界に貢献する港湾空港技術, VOL.44, 2021.7
9) 高知県・須崎市（2016）：須崎港長期構想(案), 2016.12
10) Tanaya et al.（2021）：Improvement of the coral growth and cost-effectiveness of hybrid infrastructure by an innovative breakwater design in Naha Port, Okinawa, Japan, Coastal Engineering Journal vol.63
11) 国土交通省（2014）：生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドライン
12) 北原ら（2008）：釧路港島防波堤背後盛土上の物理環境と藻場形成に関する研究，寒地土木研究所月報 No.657
13) 国土交通省（2022）：北海道開発局 記者発表：釧路港島防波堤での藻場の創出による CO_2 貯留効果を確認！～ブルーカーボンによる脱炭素社会への貢献～

3.4　CR に係る関連技術等

3.4.1　CO_2 直接回収技術（Direct Air Capture；以下、DAC）

(1) DACの技術概要

DAC とは、大気中の CO_2 を直接分離回収する技術であり、燃焼排ガス等からの CO_2 分離回収技術と使用する原理は同じである。

CO_2 分離回収等技術開発と DAC の関係性を図 3.4.1-1 に示す [1)]。

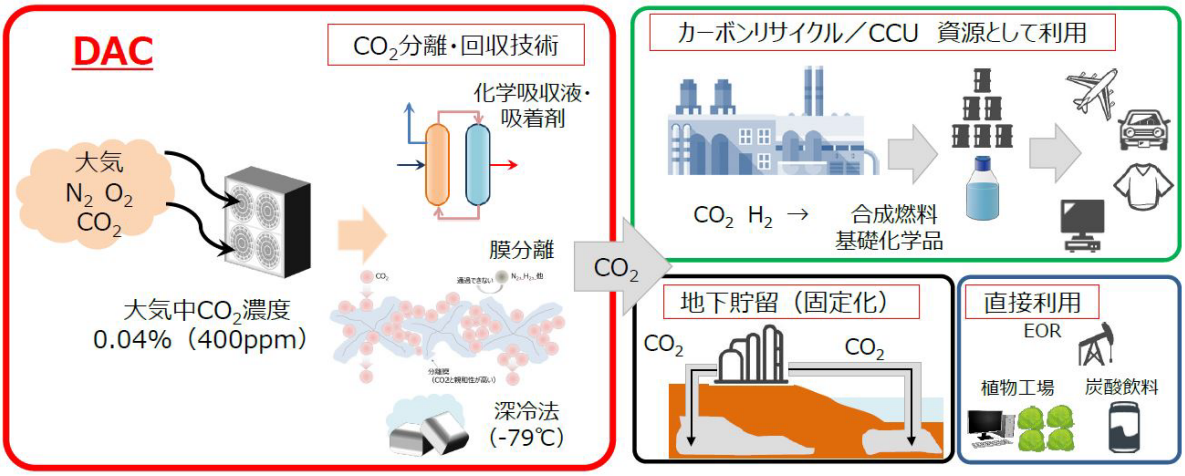


図 3.4.1-1　CO_2 分離回収等技術開発と DAC の関係性 [1)]（出典：経済産業省，2021）

① DAC の技術概要

DAC は、大気中の CO_2 を直接分離回収する技術であり、吸収液や吸着材に空気中の CO_2 を吸収・吸着させ、その後、加熱や減圧などの操作で吸収液や吸着材から CO_2 を分離回収する「化学吸収・吸着法」やイオン交換膜を用いる「膜分離」、CO_2 が含まれたガスを冷却し、ドライアイスとして回収する「深冷法」などがある。

② DAC のメリット・デメリット

DAC は、CO_2 が排出する場所に隣接して設置する必要がなく、導入のために既存の発電所や工場の操業に影響を与えることがない。また、CO_2 排出源の運用に左右されないほか、貯留施設の近傍や、回収に必要なエネルギー及びユーティリティーの供給が有利な地点に設置できるなど立地の自由度が高いという立地条件でメリットがあり、それが CCU での CO_2 需要地の近傍となれば輸送コストの削減にもなる。さらに、既に排出された CO_2 でも、将来任意のタイミングで一定の濃度まで CO_2 を回収するといった柔軟な対策が取れる。

一方、課題としては、大気中の CO_2 濃度が 0.04%（400ppm）と他の回収方法に比べ濃度が低いため、回収にはより大きなエネルギーが必要となり、コストが非常に高くなる。

③ DAC を含めた CO_2 の分離回収と CCU

DAC を含めた CO_2 の分離回収と CCU について、図 3.4.1-2 に示す [2)]。

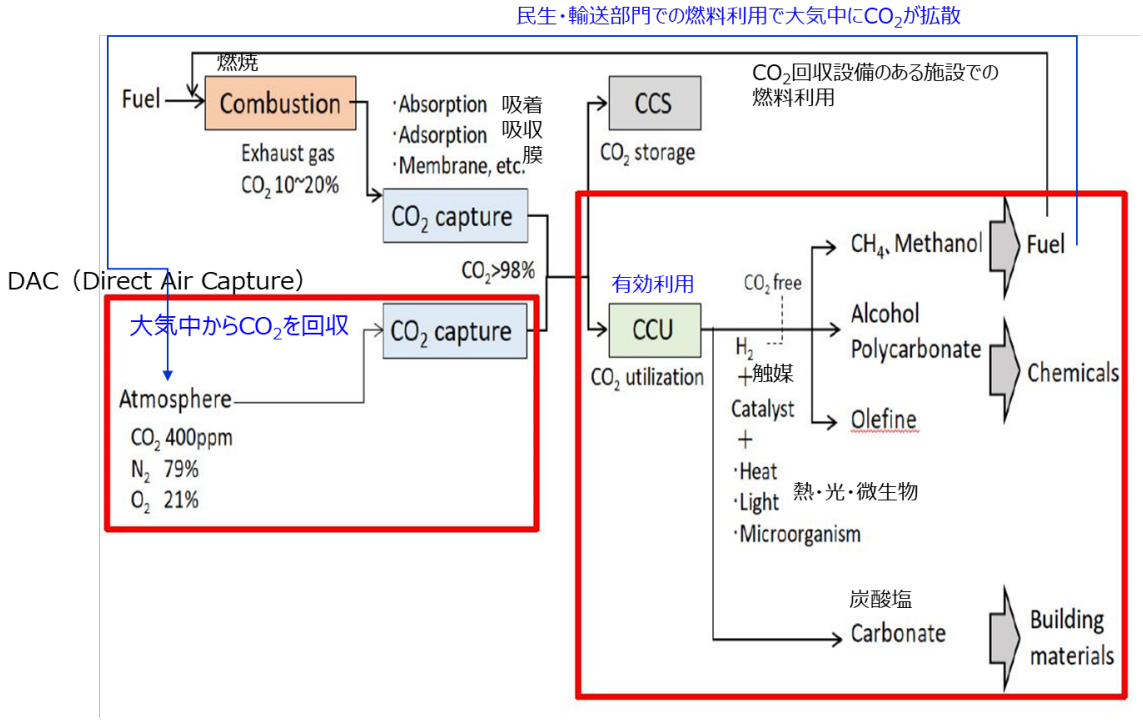


図 3.4.1-2　DAC を含めた CO_2 の分離回収と CCU [2)]（出典：山地，2021）

DAC を含め分離回収技術にて回収された CO_2 は、地下貯留処理（EOR 含む）に加え、長期的には、燃料や化学品、鉱物（コンクリート）等カーボンリサイクル原料としての用途拡大が想定され、カーボンリサイクルビジネス（カーボンマネジメント、カーボンリサイクル製品製造販売等）への展開が期待される。

(2) 日本におけるDACの技術概要

① 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

経済産業省が関係省庁と連携して策定した「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において、成長が期待される重要分野（14 分野）のひとつとして、カーボンリサイクル･マテリアル産業が取り上げられており、そのなかで、DAC を含む CO_2 分離回収技術についても成長戦略工程表が策定され､取り組みを推進していくこととしている。

カーボンリサイクル・マテリアル産業（カーボンリサイクル）の成長戦略工程表を表 3.4.1-1 に示す [3)]。

表 3.4.1-1　カーボンリサイクル・マテリアル産業（カーボンリサイクル）の成長戦略工程表 [3)]（出典：経済産業省，2021）

現状は、DAC の技術開発について、欧米のベンチャー企業が商用化を見据えた研究開発を加速させているものの、世界的にも要素技術開発の段階である。国内でも、ラボレベルでの開発を 2020 年から開始しているが、エネルギー効率が低く、大気中からの CO_2 回収コストが高いことが課題となっている。

今後の取組として、大気中からの高効率な CO_2 回収方法について技術開発を進め、低コスト化を実現し、2050 年の実用化、導入拡大を目指すこととしている。

② カーボンリサイクルロードマップ

経済産業省が 2019 年 6 月に策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」の 2021 年 7 月改訂においては、DAC について開発が進展・加速している状況を踏まえ、ロードマップ上に新たに追記された。さらに 2023 年 6 月「カーボンリサイクルロードマップ」として改訂された。

カーボンリサイクル技術について図 3.4.1-3 に、カーボンリサイクルロードマップ【別冊 1】技術ロードマップにおける DAC について図 3.4.1-4 に示す [4)]。

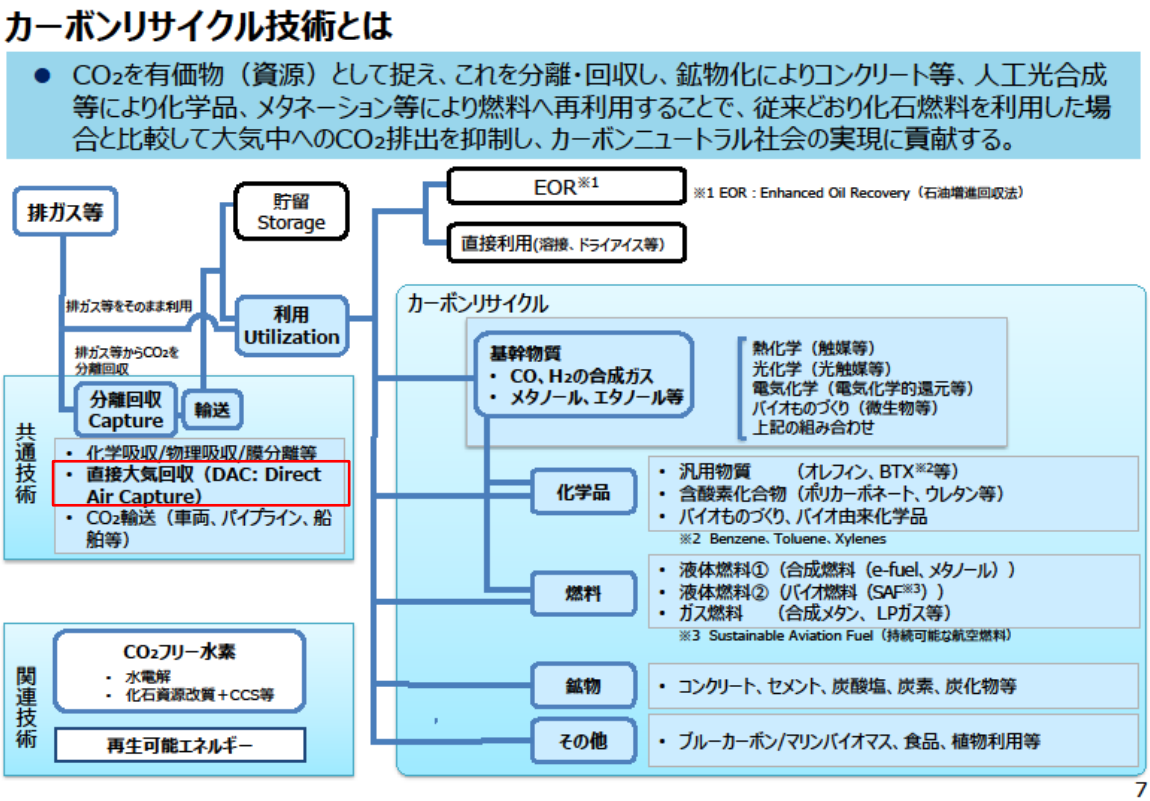


図 3.4.1-3　カーボンリサイクル技術とは [4)]（出典：経済産業省，2023）

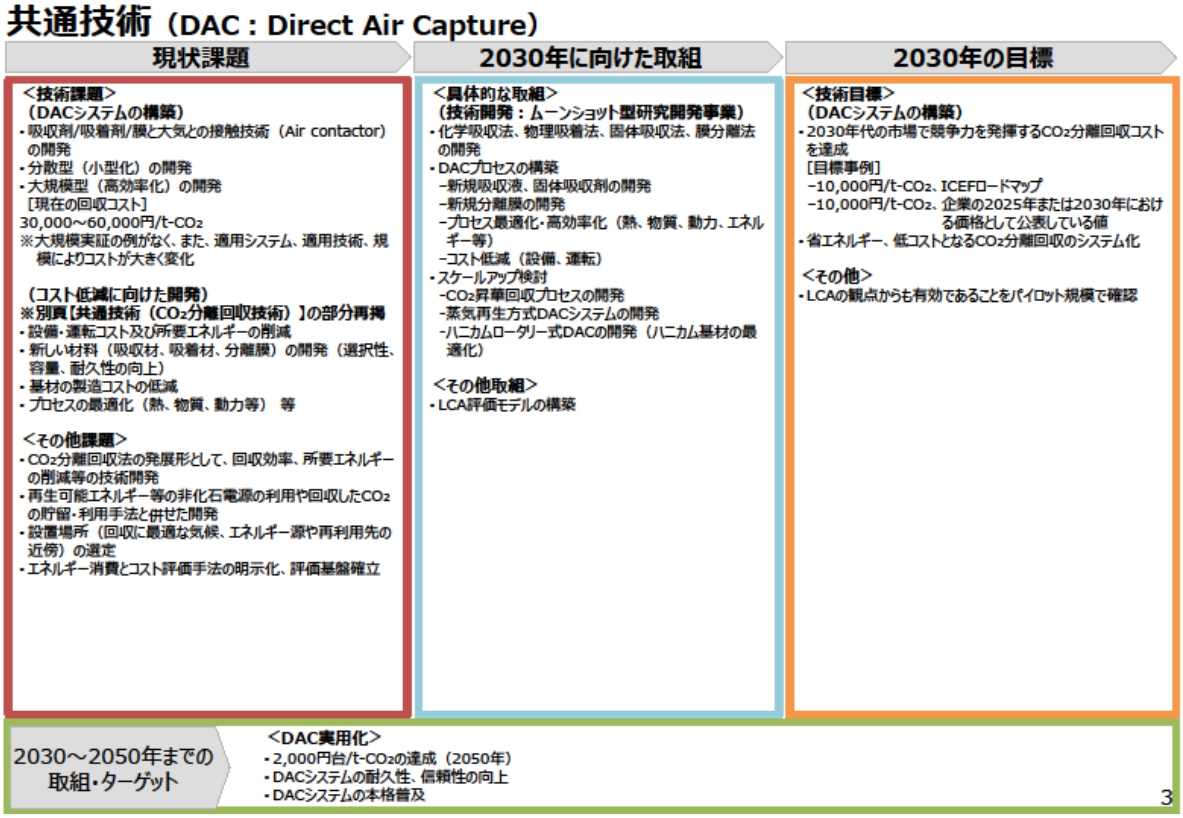


図 3.4.1-4　カーボンリサイクルロードマップ

【別冊１】技術ロードマップにおける DAC [4)]（出典：経済産業省，2023）

③ ムーンショット型研究開発事業

ムーンショット型研究開発制度は、我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発（ムーンショット）を推進する国の大型研究プログラムで、3 つの領域から具体的な 9 つの目標を決定している。

ムーンショット目標 4「2050 年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」における研究開発プロジェクトとして、「大気中からの高効率 CO_2 分離回収・炭素循環技術の開発」、「冷熱を利用した大気中二酸化炭素直接回収の研究開発」など DAC に関する研究開発が推進されている。

「大気中からの高効率 CO_2 分離回収･炭素循環技術の開発」の概要図を図 3.4.1-5 に、開発スケジュールを表 3.4.1-2 に示す [5)]。

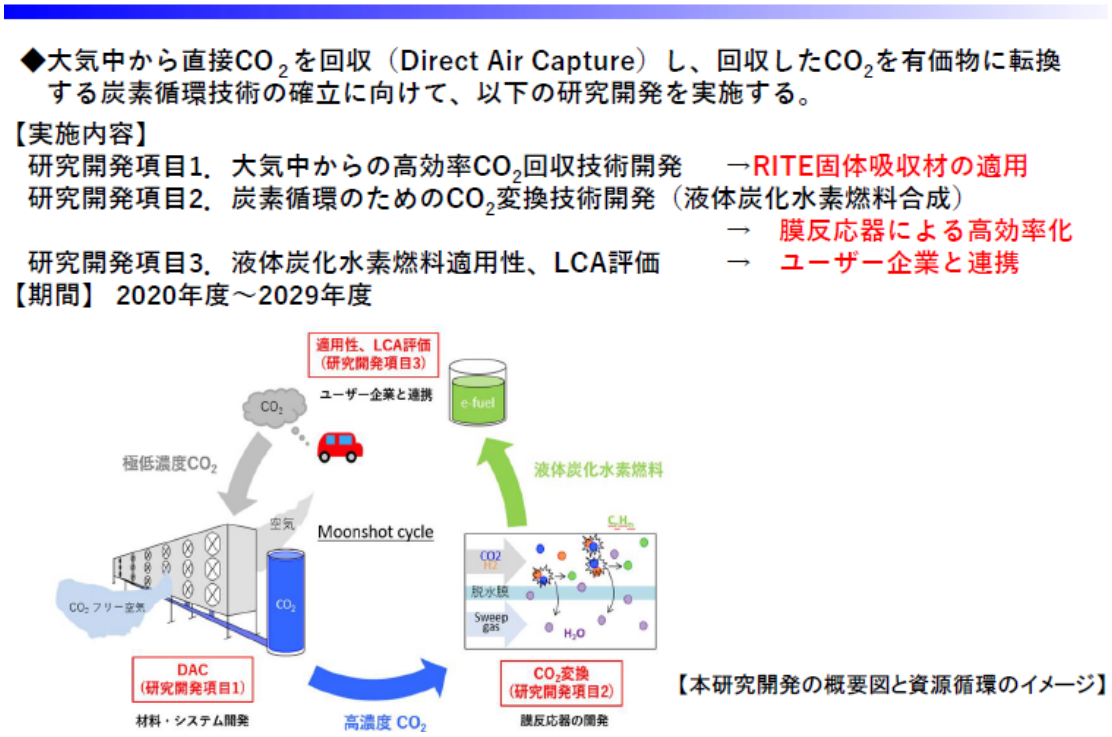
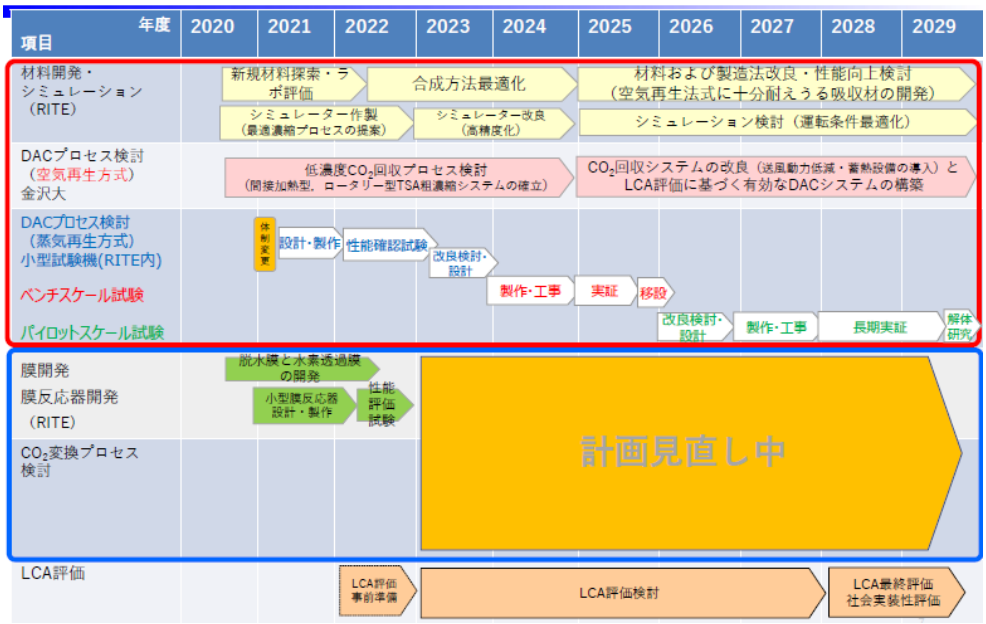


図 3.4.1-5 「大気中からの高効率 CO_2 分離回収･炭素循環技術の開発」の概要図 [5)]

（出典：NEDO, 2023）

表 3.4.1-2　開発スケジュール[5]（出典：NEDO, 2023）



本研究開発プロジェクトにおいては、各研究開発項目について最終目標を掲げ、将来的な炭素循環社会の実現に目途を得ることを目指し、研究開発に取り組んでいる。

「大気中からの高効率 CO_2 分離回収･炭素循環技術の開発」の最終目標を図 3.4.1-6、社会実装のイメージを図 3.4.1-7 に示す[5]。

研究開発項目1.　「大気中からの高効率CO2回収技術開発」

・開発した固体吸収材を用いた数t/day 規模のパイロットスケール試験を実施し、CO_2 変換反応に適用可能な純度のDAC技術を確立する。

・分離回収エネルギーや分離回収コストを踏まえ、地球温暖化問題対策として有効なDACシステムの構築に目途を得る。

（目標設定理由：海外の先行事例を超える性能を達成）

研究開発項目2.　「炭素循環のためのCO2変換技術開発」

・DACで回収された CO_2 を原料として液体炭化水素燃料を高効率で製造可能な CO_2 変換技術を開発する。

・Extractor-Distributor一体型膜反応器等による反応の制御と高効率化の検討を行い、実用に資する CO_2 の変換率を達成可能な最適膜反応プロセスをパイロットレベルで実証し、実用化に目途を得る。

（目標設定理由：商用運転のFT合成変換効率80%と同等レベル）

研究開発項目3.　「液体炭化水素燃料適用性、LCA評価」

・大気中からの CO_2 回収と回収した CO_2 の変換反応を通じたLCA評価により CO_2 の削減効果を検証し、地球温暖化問題対策として有効であることを確認する。

・ユーザー企業による液体炭化水素燃料の適用性評価を行い、早期社会実装が可能であることを確認する。

（目標設定理由：早期社会実装にはユーザー企業と連携した評価が不可欠）

→ 将来的な炭素循環社会の実現に目途を得る

図 3.4.1-6　「大気中からの高効率 CO_2 分離回収･炭素循環技術の開発」の最終目標[5]（出典：NEDO, 2023）

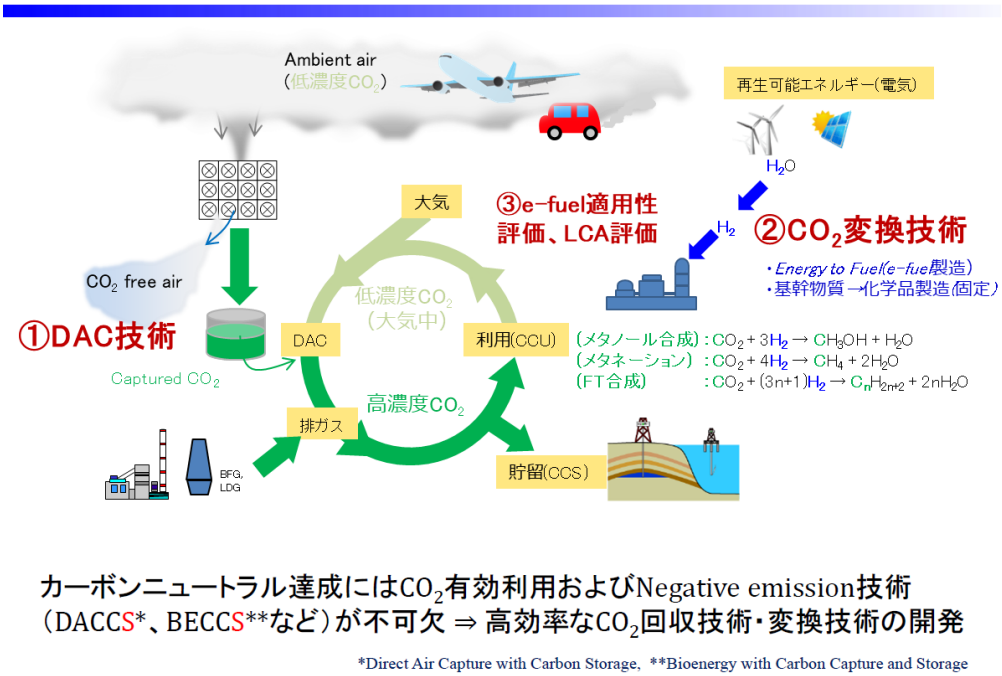


図 3.4.1-7　社会実装のイメージ[5]（出典：NEDO, 2023）

研究開発プロジェクト「冷熱を利用した大気中二酸化炭素直接回収の研究開発」においては、Cryo-DAC※1 の研究開発に取り組んでいる。（※1.Cryogenics（冷熱）と DAC を組み合わせた造語）

Cryo-DAC の概要図を図 3.4.1-8、開発スケジュールを表 3.4.1-3 に示す[6]。

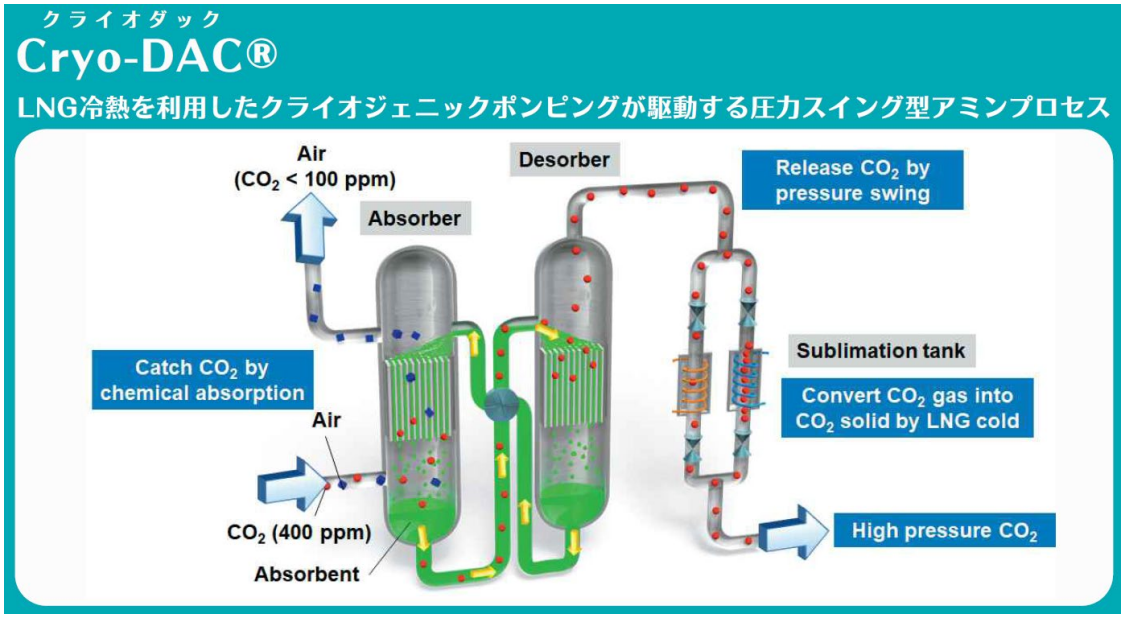
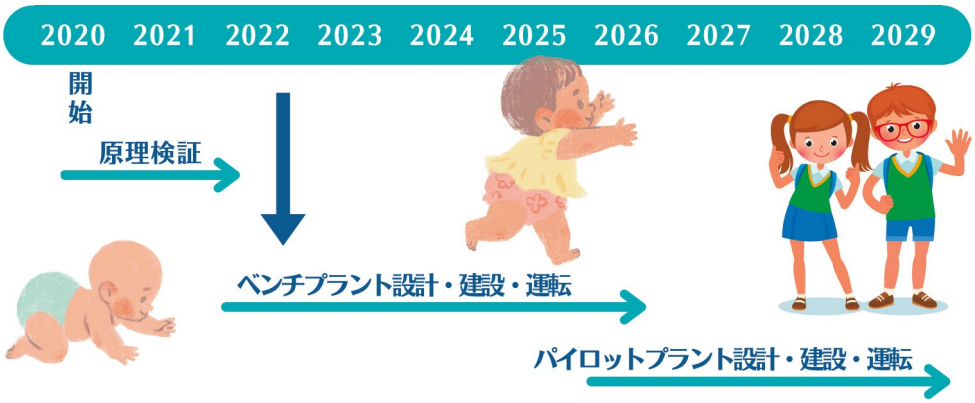


図 3.4.1-8　Cryo-DAC の概要図[6]（出典：NEDO, 2023）

表 3.4.1-3　開発スケジュール[6)]（出典：NEDO，2023）



化学吸収法をベースに LNG の気化熱を利用し、CO_2 をドライアイスとして回収することで再生塔を減圧して CO_2 の回収を行う。分離回収にかかるエネルギー・コストを低減できるほか、気化熱によって減圧環境を作るため、真空ポンプ不要となる。

先行 DAC では、吸着剤の再生には加熱が必要となるが、常温で減圧再生できる本仕組みはコストの低減が期待できる。

Cryo-DAC の所要エネルギーを図 3.4.1-9、CO_2 回収コストを図 3.4.1-10 に示す[6)]。

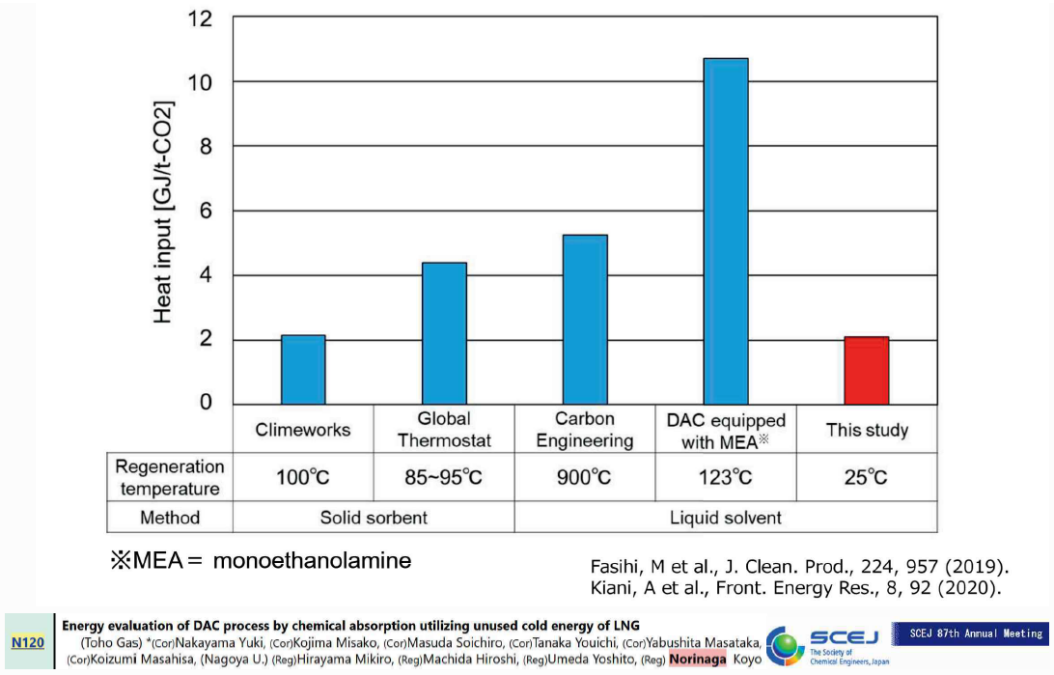


図 3.4.1-9　Cryo-DAC 所要エネルギー[6)]（出典：NEDO，2023）

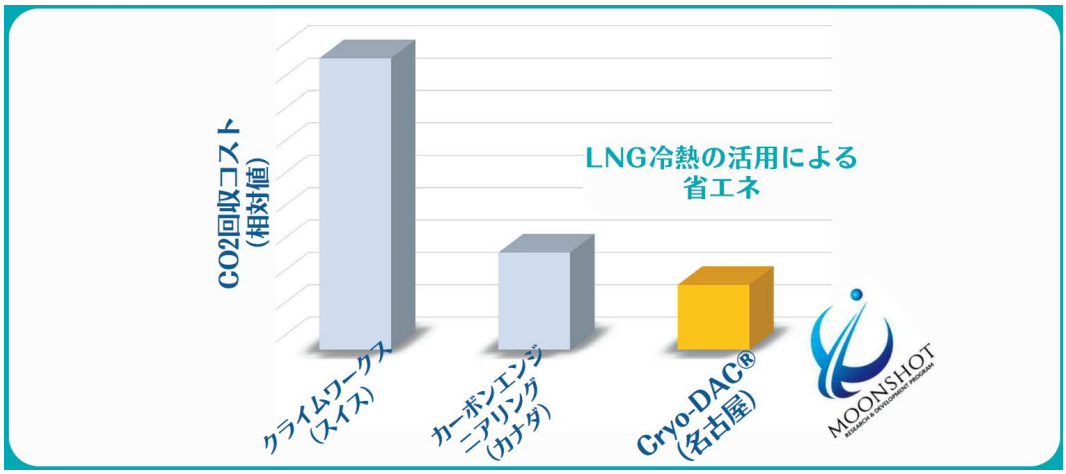


図 3.4.1-10　Cryo-DAC CO_2 回収コスト[6)]（出典：NEDO, 2023）

④ 主な取り組み

そのほか、国内における企業･大学の取組み状況を表 3.4.1-4 に示す。

表 3.4.1-4　国内における企業･大学の取組み状況

企業･大学	取組み状況
IHI	アミン溶液に浸し乾燥させ固化した球体の基材に CO2 を吸着させ、熱を加え、分離させる。2022 年に回収した CO2 を植物工場で活用する実証実験を福島県相馬市で開始する。2023 年にも実用化を想定。
三菱重工	共同開発中の独自固体吸着材を使用し、2022 年に 1 日数十キロを回収する実証試験立ち上げ。2025 年にはさらに規模の大きな 1 日数トンを回収する実証プラントを立ち上げ予定。
東邦ガスや名古屋大学など	都市ガス製造過程で余った冷熱を使った DAC 装置(Cryo-DAC：クライオーダック)を開発。2024 年度までに年間 1 万トンの CO2 を回収する試験機をつくり、2030 年以降の実用化を目指す。
川崎重工	潜水艦等の閉鎖空間中 CO2 除去技術を応用、多孔体にアミンを担持した固体吸収材を開発し従来方式より低温で CO2 を回収。 1 日 500～1000 キログラムの DAC 装置を 2025 年に実用化予定。
九州電力	膜分離によって空気中の CO2 を 0.04%から 40%以上へ濃縮できるということを示し、低純度の CO2 でも地中に貯留できることを提示。
金沢大学	空気が通りやすく、表面積が大きいハニカム構造のローターに、新しいアミンを塗ることで、回収・分離するためのエネルギーを大幅に下げ、2025 年以降、このシステムを大型化して実証実験を行い、年間約 550 トンの二酸化炭素の回収を目指す。
東京都立大学	シクロヘキシルアミン基をもつジアミン化合物の一種であるイソホロンジアミンが二酸化炭素と反応すると、不安定なカルバミン酸が固体として得られることを利用して、大気中の低濃度二酸化炭素を高速で吸収できる DAC 技術の開発に成功した。ジアミン分子を用いた相分離を利用することで二酸化炭素吸収速度の向上と反応系からの生成物の分離を実現し、ガス流通下でも 400ppm の二酸化炭素を 99%以上の高効率で除去する。

(3) 海外におけるDACの技術開発

DAC 技術について、世界中で巨額の投資が行われつつある中、米国エネルギー省（以下、DOE）においても当該技術に関わる研究開発促進の動きが次々に発表されている。

DOE の DAC プロジェクト概要について、表 3.4.1-5 に示す [7]。

表 3.4.1-5　DOE の DAC プロジェクト概要 [7]（出典：橋﨑，2022）

１１．DOEのDACプロジェクト概要　IAE The Institute of Applied Energy

	Project Name	Cotent
L－①	FEED Study for Climeworks Direct Air Capture at a California Geothermal Facility with Long-Term Storage	イリノイ大学理事会がClimeworks社のDACシステムをカリフォルニア州ブラウリーのブラウリー地熱発電所の熱エネルギーを用いて運用し、分離回収したCO2は近傍で地中貯留する検討を行う。
L－②	Nuclear Powered DAC Project in Illinois	コンステレーション（メリーランド州電力・ガス供給会社）のイリノイ州の原子力DACプロジェクトでは、Carbon Engineering社のDACシステムをイリノイ州のバイロン原子力発電所（軽水炉）の廃熱で稼働させる予定。回収CO2は輸送し、地中貯留する検討を行う。
L－③	Nuclear Direct Air Capture with Carbon Storage	バテル記念研究所（研究機関）は、アラバマ州コロンビアにあるサザンカンパニーのジョセフ・M・ファーレイ原子力発電所から得られる熱エネルギーを利用し、AirCapture社のDACシステムを稼働させる検討を行う。
I－④	FEED Study of Carbon Capture Inc. DAC and Carbon Cure Utilization Technologies Using United States Steel's Gary Works Plant Waste Heat	イリノイ大学理事会は、インディアナ州ゲーリーにあるUS Steelのゲーリー工場で、CarbonCapture社とCarbonCure社がそれぞれ開発した直接空気捕捉（DAC）とCO2変換技術を用いて、コンクリート製品に変換する直接空気捕捉・利用システム（DACUS）について検討を行う。
I－⑤	Low-Carbon Intensity Formic Acid Chemical Synthesis from Direct Air Captured CO2 Utilizing Chemical Plant Waste Heat	AirCapture社は、ワシントン州ケネウィックにあるNutrien社のケネウィック肥料工場の低炭素熱エネルギー源を活用し、DACシステムで回収したCO2から化学物質（ギ酸）に変換する検討を行う。

IAE 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所　12

海外の DAC 企業としては、カナダのカーボンエンジニアリング社、スイスのクライムワークス社、米国のグローバルサーモスタット社などが先行して実用化に取り組んでいる。

海外の DAC 企業の大規模化の動きについて、表 3.4.1-6 に示す [8]。

表 3.4.1-6　海外の DAC 企業の大規模化の動き [8]（出典：余語，2022）

海外のDAC企業の大規模化の動き*

RITE Research Institute of Innovative Technology for the Earth

*各企業HP,各種資料よりRITE作成：昨年度シンポジウム資料をアップデート

企業	実施場所		Project（協力企業）	CO_2回収量	適用先	期間
Carbon Engineering (Canada)	米国	Permian Basin in West Texas	Occidental Petroleum 1PointFive	100万t/y 設計中 (2035年までに70基(最大135基)を計画)	EOR/地中貯留	2022に建設開始、2024年後半開始予定（世界初の100万t/y DACプラント）
	英国	North-East Scotland	Dreamcatcher Project（Storegga） AtmosFUEL Project (LanzaTech UK、British Airways、Virgin Atlantic)	50～100万t/y 設計中	Acorn CCS プロジェクトとの連携 1億L/yのJet燃料	2021　FS 2022　詳細設計 2026年までに稼働
	カナダ	Squamish, British Columbia	Direct Air Capture Innovation Center (BBA)	不明（操作,実験用1,250m²の建物）	DACとAIR TO FUELS プロセスの完全統合	隣接パイロットプラントで2015年からDAC、2017年から燃料変換
Climeworks (Swizerland)	アイスランド	Hellisheiði Geothermal Power Plant	Project Silverstone (Carbfix, ON Power) Project Orca(Carbfix) Mammoth（6月着工）	7万ton圧入済 計画34,000t/y 4,000t/y (現状世界最大) 3.6万t/y	地中（玄武岩層）貯留	2012 Pilotスケール開始 2021 9月～Orca稼働 1年半～2年後Mammoth稼働予定(2050年までに10億t/y達成)
	ドイツ スウェーデン	Dresden Herøya	Koperniks(Power-to-X) Project (Snnfire, INERATEC)	不明	FT合成 (Norsk e-Fuel)	2023年　1000万L 2026年　1億 L 予定
Global Thermostat (USA)	チリ	Magallanes (チリ南のパタゴニア地方)	Haru Oni Project (Porsche, Siemens Energy, Enel Green Power, ENAP, ExxonMobil)	1ユニット当たり2,000t/y×4基～スケールアップ計画 他4カ所も計画中	eFuel合成（MTG）	2022　13万L 2024　5500万L 2026　5.5億L のeFuel製造 10月日本法人設立

30

① カーボンエンジニアリング社（カナダ）

カーボンエンジニアリング社は 2015 年からカナダのブリティッシュ・コロンビア州で実験プラントを持ち検証を進めている。

また、米国テキサス州西部パーミアン盆地において、オクシデンタル石油の子会社（1PointFive）と提携し、年間最大 100 万 t 規模の DAC プラントを 2022 年に建設開始し、2024 年後半に開始を予定している。（2035 年までに 70 基（最大 135 基）を計画）

カーボンエンジニアリング社の DAC 技術について、図 3.4.1-11 に示す [9]。

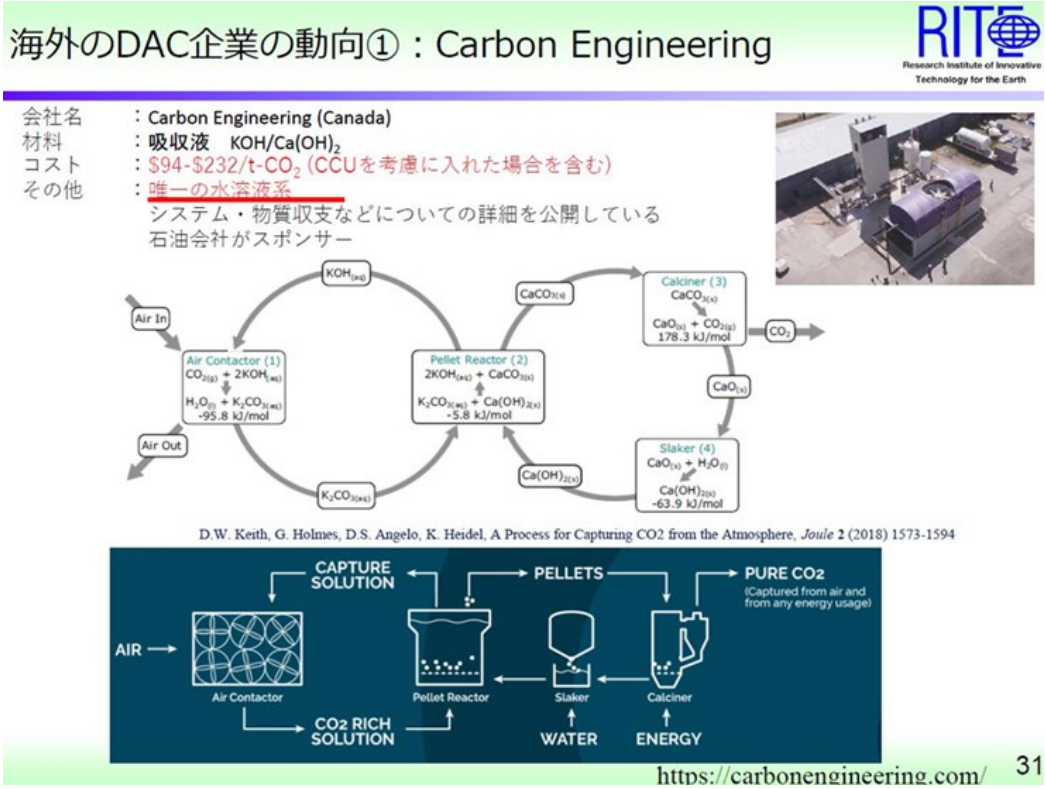


図 3.4.1-11　Carbon Engineering 社の DAC 技術 [9]（出典：余語，2021）

巨大なファンで空気を取り込み、KOH 水溶液と CO_2 を反応させ、炭酸カリウムを生成、さらに水酸化カルシウムと反応させることで炭酸カルシウムが生成され、CO_2 を焼成により取り出す。

② クライムワークス社（スイス）

クライムワークス社は、スイスのチューリッヒ州ヒンヴィルで世界初の商用 DAC プラント（900t-CO_2/年）を 2017 年 5 月に運転開始した。

ごみ処理施設屋上に設置された DAC プラントでは、大気からフィルター（固体吸収材）にて直接捕捉された CO_2 をごみ処理施設の排熱を利用して分離回収され、近くの温室へ供給し農業利用している。

クライムワークス社の商用 DAC プラントを図 3.4.1-12 に示す [10]。

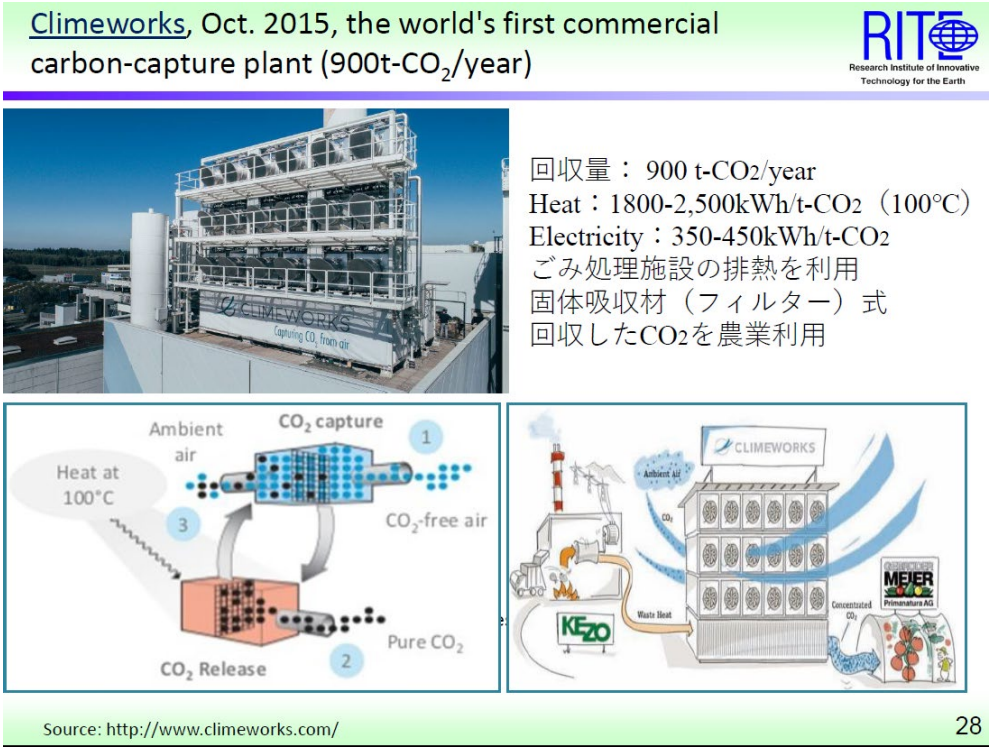


図 3.4.1-12　Climeworks 社 商用 DAC プラント [10]（出典：余語，2020）

アイスランドでは、地熱発電所から流れてくる水を利用して、大気から直接回収した CO_2 を地下に送り込み、炭酸塩として地下に貯蔵するプラントを 2021 年に稼働させた（Orca Project）。年間最大 4,000t の回収量は現時点で世界最大である。

Orca Project について図 3.4.1-13 に示す [9]。

図 3.4.1-13　Orca Project [9]（出典：余語，2021）

大気を吸引し、固体の吸着フィルターで CO_2 を吸着させ、残りの空気は大気中に放出される。フィルターの吸着容量の上限に近づくと、100℃に加熱して CO_2 を放出させ、分離回収した CO_2 を水に溶解させる。CO_2 を溶解させた水は地中の玄武岩層に注入し、炭酸塩化（自然の鉱化作用を使って炭酸カルシウムに変化）させる。注入した CO_2 の 95%が 2 年以内に鉱物化する。

さらに、クライムワークス社は 2022 年 6 月新たな DAC プラントの着工を発表した。「Mammoth」と呼ばれるこの新しいプラントは、建設に 18～24 ヵ月を予定し、年間 36,000 トンの CO_2 回収量を見込んでいる。

③ グローバルサーモスタット社（アメリカ）

アメリカのグローバルサーモスタット社は、カリフォルニア州とアラバマ州にパイロットプラントを建設し、現在はチリのパタゴニア地方で水素を CO_2 と反応させた e-Fuel を製造する。グローバルサーモスタット社の動向について、図 3.4.1-14 に示す [9]。

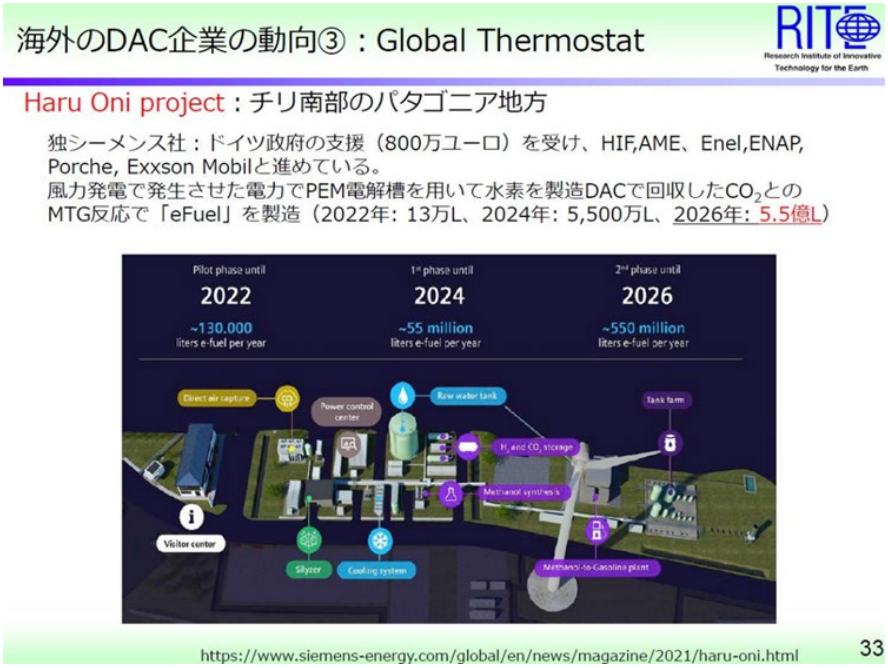


図 3.4.1-14　Global Thermostat 社（アメリカ）の動向 [9]（出典：余語，2021）

(4) DAC導入量の見通し

IEA では 2050 年の CO_2 ネットゼロに向けたシナリオの中で、DAC による CO_2 回収量を 2030 年で 8,500 万 t 、2050 年で 9.8 億 t と想定している。

DAC による CO_2 回収量の予測を図 3.4.1-15 に示す [11]。

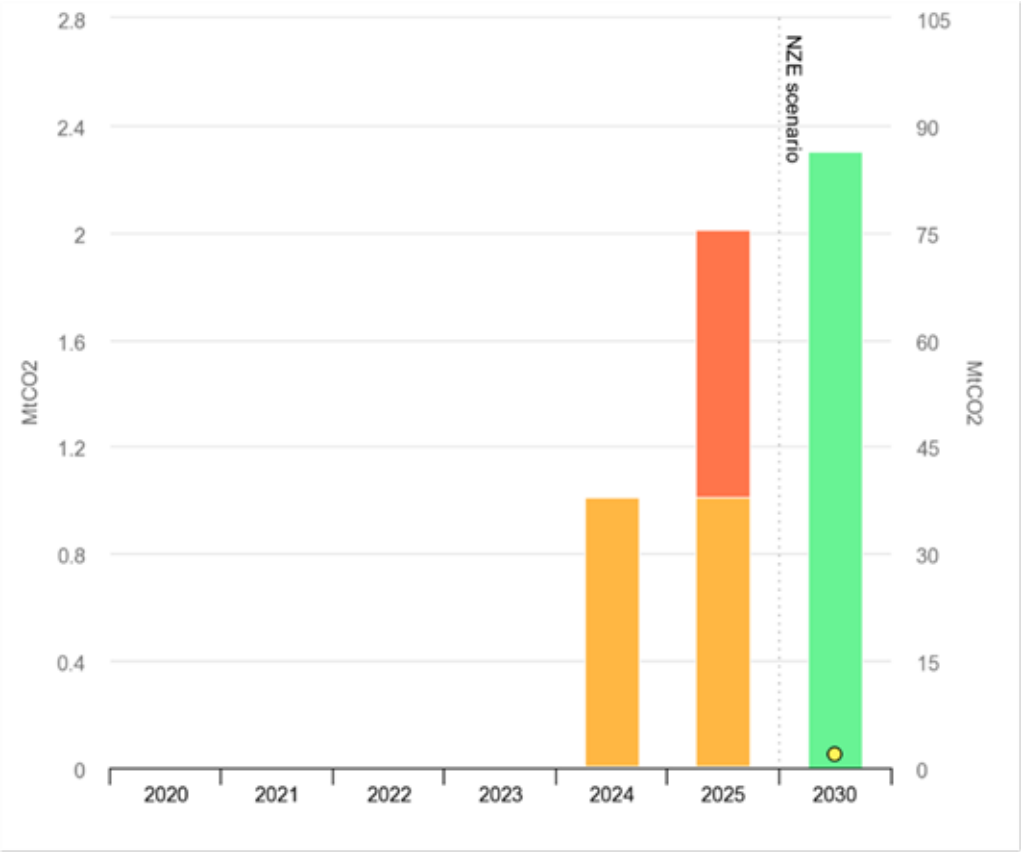


図 3.4.1-15　DAC による CO_2 回収量の予測 [11]（出典：IEA ホームページ）

RITE によると、世界のエネルギー起源 CO_2 排出量は 2050 年予測で約 563 億 t に達すると見込まれる中、約 17%を DAC に期待していると考えられる [12]。

(5) DACのコスト見通し

前述のとおり、DAC については、現状、エネルギー効率が低く、大気中からの CO_2 回収コストが高いことが課題となっている。

2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略において、今後の取組として、大気中からの高効率な CO_2 回収方法について技術開発を進め、低コスト化を実現し、2050 年の実用化、導入拡大を目指すこととしている。

カーボンリサイクルロードマップにおける将来のコストターゲット（円/t-CO_2）について、表 3.4.1-7 に示す [4]。

表 3.4.1-7　カーボンリサイクルロードマップにおける将来のコストターゲット（円/t-CO_2）[4]（出典：経済産業省，2023）

（参考）カーボンリサイクル技術・製品概要

※1　現状のカーボンリサイクル製品の価格は事務局調べ
※2　既成製品の価格は統計情報や調査結果等に基づく参考値
※3　「CO2等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性（第8回 産構審GIプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野 WG(2021年12月23日)）における目標値
※4　「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(2021年6月)における目標値

	CO_2変換後の物質	カーボンリサイクル技術開発の現状	課題	既存製品の価格(2023年１月現在)	2030年	2040年以降
基幹物質	合成ガス メタノール等	一部実用化、革新的プロセス(光、電気等利用)は技術開発段階	変換効率・反応速度の向上、触媒の耐久性向上　等	–	製造コストの低減	製造コストの更なる低減
化学品	汎用品 (オレフィン、BTX等)	一部実用化(石炭等から製造した合成ガス等を利用) その他は技術開発段階	転換率・選択率の向上　等	約180円/kg※2 (エチレンの国内販売価格)	製造コストの低減	製造コストの更なる低減
	含酸素化合物	一部実用化(ポリカーボネート等)、その他は技術開発段階 【価格例】 既存の同等製品程度(ポリカーボネート)	ポリカーボネートはCO_2排出量の更なる削減 ポリカーボネート以外の実用化(転換率・選択率の向上)	約400円/kg※2 (ポリカーボネートの国内販売価格)	既存製品と同等のコスト	製造コストの更なる低減
	バイオものづくり、バイオ由来化学品	技術開発段階(CO_2や非可食性バイオマス等を原料とした物質生産)	低コスト・効率的な前処理技術、微生物改変技術　等	–	既存製品の1.2倍程度のコスト	更なる低コスト化
燃料	液体燃料 (バイオ燃料（SAF）)	技術開発/実証段階 【価格例】SAF1600円/L※1	生産率向上、低コスト・効率的な前処理技術　等	100円台/L※2 (ジェット燃料の国内販売価格)	製品コストの低減	更なる低コスト化
	液体燃料 (合成燃料(e-fuel))	技術開発段階(合成燃料(e-fuel)) 【価格例】 合成燃料　約300～700円/L※1	現行プロセスの改善、システム最適化　等	約170円/L※2 (ガソリンの国内販売価格)	–	既存の製品と同等のコスト (約100-150円/L)※3
	ガス燃料 (合成メタン、LPガス等)	技術開発/実証段階	システム最適化、スケールアップ、高効率化　等	105円/Nm^3※2 (天然ガスの輸入価格)	製造コストの低減	既存の製品と同等のコスト (40-50円/Nm^3) ※4
鉱物	コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物	一部実用化、 低コスト化に向けた技術開発段階 【価格例】数百円/kg(道路ブロック)	CO_2と反応させる有効成分の分離、微粉化、低コスト化　等	30円/kg※2 (道路ブロック用プレキャストコンクリートの国内販売価格)	道路ブロック等、技術成熟度が高い製品について、既存の製品と同等のコスト	新たに用途拡大された製品について、既存製品と同等のコスト
共通技術	CO_2分離回収 (DAC含む)	一部実用化(化学吸収法)、 その他手法は技術開発段階 【価格例】 約4000円～6000円/t-CO_2 (化学吸収法)	所要エネルギーの削減　等	–	1000-2000円台/t-CO_2 (共通技術(CO_2分離回収技術)のスライド参照)	1000円以下/t-CO_2 2000円以下/t-CO_2 (DAC)
基盤物質	水素	概ね技術確立済み(水電解等)、他の手法含め低コスト化に向けた技術開発を実施	低コスト化　等	–	30円/Nm^3※4	20円/Nm^3※4 (プラント引き渡しコスト)

10

主な課題としては、アミンなどの吸収物質は繰り返し使うと回収能力が下がり、蒸発して量が減ることや吸着材の加熱再生にエネルギーコストがかかるため改善が必要な点などがある。回収に必要な大量のエネルギーについては、加熱エネルギーの削減を含めエネルギー源として、再生可能エネルギーまたは余剰エネルギーを活用することでコスト低減していくことが必要である。

上記の課題があるものの、立地条件や CO_2 供給元に隣接することが必須ではなく、回収に必要なエネルギーやユーティリティーの供給が有利な地点に設置しやすいなどのメリットも大きいため、国土が小さく、温暖化対策に広大なエリアを確保することが困難な日本にとって、早期の低コスト化および実用化、導入拡大が期待される。

参考文献

1) 経済産業省（2021）：「CO_2の分離回収等技術開発」プロジェクトの研究開発･社会実装の方向性, 第 8 回産業構造審議会 グリーンイノベーションプログラム部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ, 資料 3, p.26

2) 山地憲治（2021）：脱炭素社会に向けた取り組みと実現へのシナリオ, 2020 年度 ALPS 国際シンポジウム－2050 年カーボンニュートラルに向けた今後の戦略－,東京, p.23

3) 経済産業省（2021）：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

4) 経済産業省（2023）：カーボンリサイクルロードマップ【別冊 1 】技術ロードマップ

5) NEDO（2023）：大気中からの高効率 CO_2 分離回収・炭素循環技術の開発, ムーンショット型研究開発事業 目標 4　成果報告会 2022

6) NEDO（2023）：冷熱を利用した大気中二酸化炭素直接回収の研究開発, ムーンショット型研究開発事業 目標 4　成果報告会 2022

7) 橋﨑克雄（2022）：Direct Air Capture による空気からの CO2 分離回収への挑戦～DOE の開発状況～, 一般財団法人エネルギー総合工学研究所第 423 回月例研究会

8) 余語克則（2022）：カーボンニュートラル達成に向けた新たな CO2 分離回収技術開発への取り組み, 未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西

9) 余語克則（2021）：カーボンニュートラル実現に向けた CO_2 分離回収技術開発への取り組み, 未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西

10) 余語克則（2020）：CCUS/カーボンリサイクル推進に向けた CO2 分離回収技術開発の展開

11) IEA ホームページ：CO2 capture by direct air capture in the Net Zero Scenario,-2020-2030, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/（2023/6 アクセス）

12) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）（2014）：RITE 世界および日本の CO_2･温室効果ガス排出見通し 2014 について

3.4.2　CR におけるエネルギー供給

(1) CRに必要なエネルギー

① CR の変換・再利用技術とエネルギー

CR は CO_2 を変換・再利用して有価物（化成品原料や燃料）を生産するものであり、CO_2 の変換経路等は後述する 4 章の図 4.1.1-1 及び表 4.1.1-1 に整理しているが、CO_2 は炭素化合物の中でエネルギー状態(標準生成ギブズエネルギー)が相対的に低い化合物である [1)2)]。鉱物化は CO_2 よりも標準生成ギブズエネルギーの低い炭酸カルシウム等への変換を利用するため炭素（C）変換プロセスでは原理的にエネルギーは不要であるが、鉱物化ではなく化成品や燃料の製造を目的として CO_2 を変換・再利用するには多くのエネルギー投入が必要となる。また、図 3.4.2-1 に示すように CO_2 を再利用して有価物を生産するには水素を必要とするプロセスが多く [3)]、水素の製造や輸送でも多くのエネルギーが必要となる。

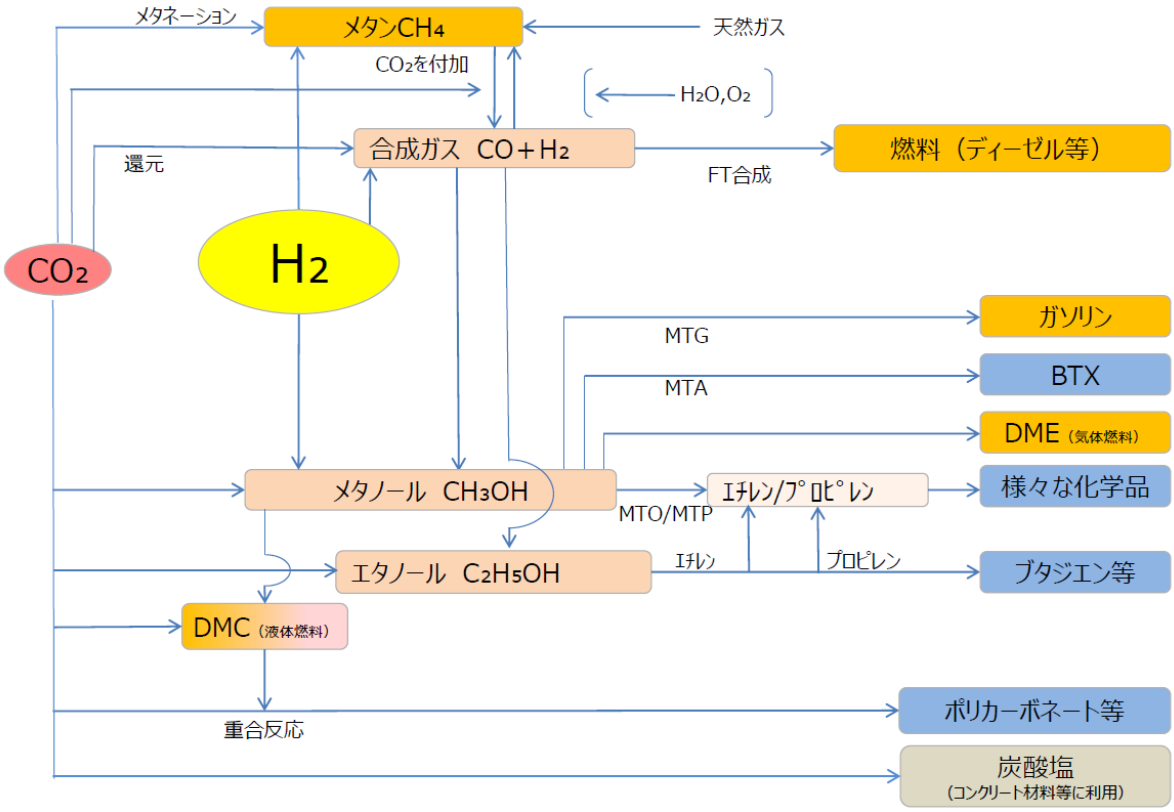


図 3.4.2-1　CR による有価物の生産 [3)]（出典：経済産業省，2021）

② CR 実現に向けたエネルギーの供給イメージ

カーボンニュートラル社会の実現を目指す CR の意義からすれば、CR に必要なエネルギー及び水素は CO_2 フリーの再生可能エネルギーにより供給できると理想的であるが、近年導入量が急拡大している太陽光発電や風力発電は自然現象に依存するため出力変動が大きいことから、再生可能エネルギーの中でも比較的出力が安定している地熱発電や出力調整しやすい水力発電を活用することも重要である。また、大規模な安定供給の観点から、CO_2 排出量の低減に資する原子力発電や、再生可能エネルギーの負荷調整にも資する火力発電は脱炭素化を図りながら利用することも必要と考えられる。様々なエネルギーを活用し、電力及び水素を供給して CO_2 を有効利用（CCU）あるいは地中貯留（CCS）するカーボンニュートラル社会の産業イメージを図 3.4.2-2 に示す [4]。

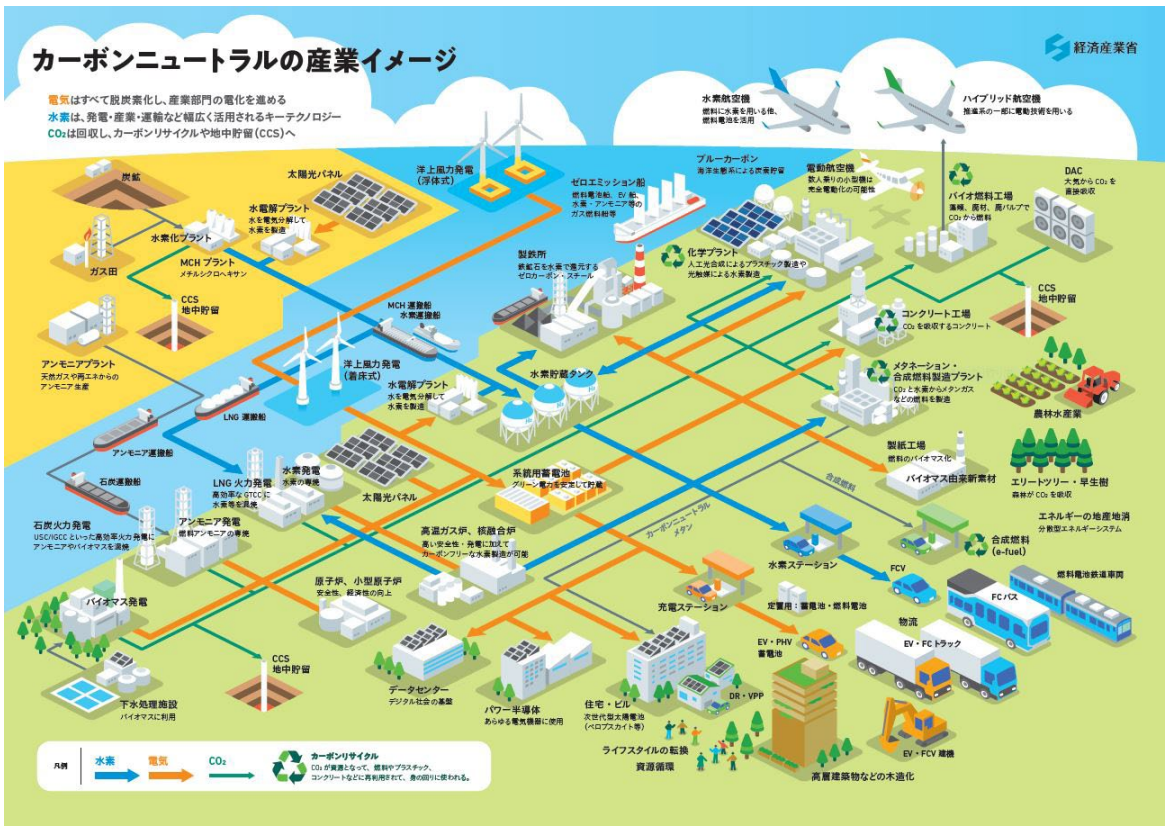
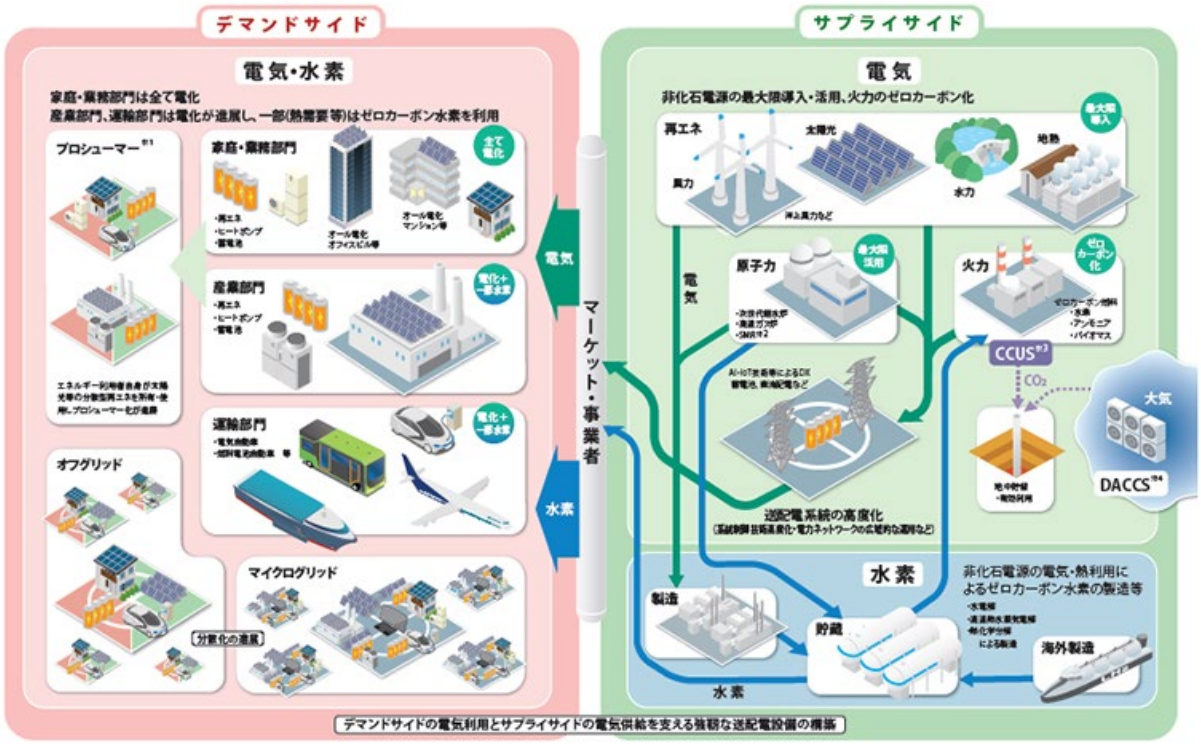


図 3.4.2-2　カーボンニュートラルの産業イメージ [4]（出典：経済産業省，2020）

国内企業におけるエネルギー及び水素の供給イメージとして、関西電力㈱の「ゼロカーボンビジョン 2050」における電気・水素の供給コンセプトを図 3.4.2-3 に示す [5]。



※1.プロシューマー：自身で発電した電気を消費し、余剰分は売電する生産消費者
※2.SMR：小型モジュール炉
※3.CCUS：排ガスからCO2を回収し、有効利用または地中等に貯留する技術
※4.DACCS：大気中からCO2を直接回収し、地中等に貯留する技術

図 3.4.2-3　関西電力㈱「ゼロカーボンビジョン」における電気・水素供給コンセプト[5)]
（出典：関西電力ホームページ）

カーボンリサイクルロードマップ（2023）の「【別冊 2】産業間連携の事例」[6)]には、海外・国内におけるカーボンリサイクルの産業間連携の事例が多数紹介されている。

このうち、Tata-Chemicals-Europe（イギリス）の事例では、熱電併給発電所（ガス焚き、40MW 級）の排ガスから CO_2 を分離回収して精製し、医療用の炭酸水素ナトリウム（病院で血液透析に使用）の原料として利用するもので、年間最大で 4 万トンの CO_2 を分離回収する施設が 2022 年 6 月に運転開始している。

また、北海道苫小牧市における産業間連携の構想は、CO_2 排出源として油ガス田・石油精製・製油所・火力発電所・その他製造業の多くが参加し、分離回収した CO_2 から燃料や化学品を製造するもので、事業化の検討が実施されている。

(2) 電力によるエネルギー供給

① 火力発電所由来 CO_2 の利用に必要なエネルギー

本調査は土木分野における CR 技術を対象としており、3.2 章で述べたコンクリート・セメント分野における鉱物化の技術が中心である。CO_2 の鉱物化において炭素（C）の変換自体には原理的にエネルギーは不要であるが、CO_2 と反応させる物質の生成にエネルギーが必要となる他、火力発電所の排ガスから CO_2 を分離・回収するプロセスや、CR 実施場所までの輸送プロセスでも多くのエネルギーが必要となる。

火力発電所由来の CO_2 による鉱物化での CR を考える場合、排ガスから CO_2 を取り出す CO_2 分離・回収プロセスは火力発電所地点で行うため、そのエネルギーは自身の発電所で発生させる電力あるいは系統電源から供給することが第一に想定される。電力需要に応じて出力調整する火力発電所での排ガス発生量は時間とともに変動し、CO_2 分離・回収のためのエネルギーもこれに応じて供給する必要があるため、供給量の予想及び調整が困難な太陽光や風力等の再生可能エネルギー電源をこれに利用する場合には、広域的な系統整備や大規模な蓄電システムの整備等による供給調整能力の向上が必要と考えられる。

また、火力発電所から CR（鉱物化）実施場所までの CO_2 輸送については、その距離が近ければ CO_2 ガスでパイプライン輸送することがコスト面で有利であり供給エネルギーも少なくて済む。CO_2 輸送コストは一般的に 200km 以上の遠距離になると船舶輸送がコスト面で有利になると言われているが、船舶輸送では効率的な輸送のため CO_2 を液化して船舶の貯蔵タンクに入れて輸送することになり、排ガスから分離・回収した CO_2 ガス（気体）を圧縮・液化するために非常に大きなエネルギーが必要になる。

CO_2 の分離・回収や船舶輸送に係る圧縮・液化での投入エネルギーを大幅に低減することは 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて CCS とも共通の重要課題として技術開発が進められており、次項では CR への再生可能エネルギー電源の利用について述べる。

② 再生可能エネルギー電源の利用について

第 6 次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの主力電源化の取組みにおいて、2030 年度の再生可能エネルギーの導入見込量を電源構成で 36～38%としている。自然変動電源（太陽光・風力）の導入拡大に伴う出力変動の増大に対する電力系統の安定的な運用のため、広域連系系統の増強を図るとともに、調整力として当面は火力発電・揚水発電を活用しつつ更なる蓄電池の普及拡大に向けた取組みや需給調整市場の整備を進めることとしている。

GX 実行会議の議論により取りまとめられた「GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ」では、第 6 次エネルギー基本計画に沿った GX の取組みとして、再生可能エネルギー、次世代ネットワーク（系統・調整力）、蓄電池等の 2050 年に向けたロードマップが示されており、図 3.4.2-5 に蓄電池産業のロードマップを示す [7]。

一方、再生可能エネルギーによる余剰電力を電気としてではなくガスに変換して貯蔵・利用する「Power to Gas」はドイツをはじめ欧州で主流になりつつある [8,9]。余剰電力による水電解での水素製造や、その水素と CO_2 とでメタン製造することにより余剰電力の貯蔵（有効利用）やカーボンリサイクルを行うもので、再生可能エネルギーを最大限利用する脱炭素化への取組みとして注目されている。

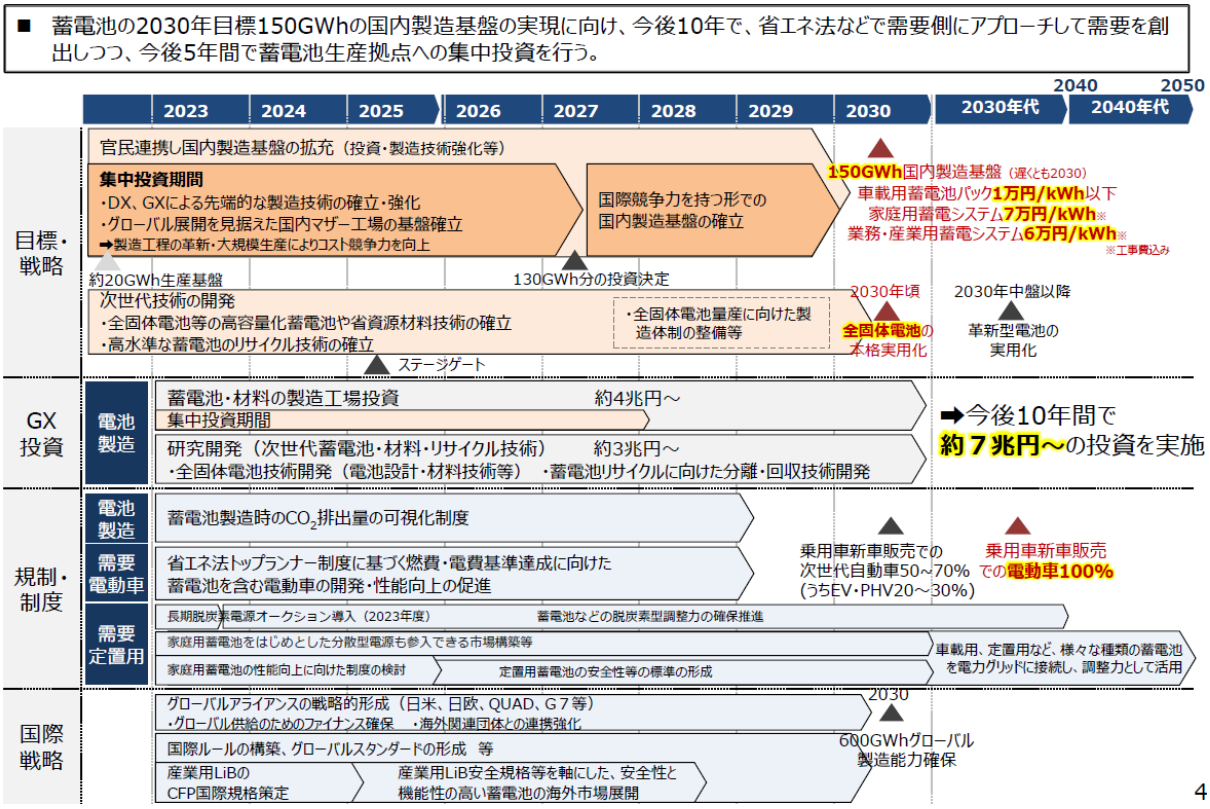


図 3.4.2-5　蓄電池産業のロードマップ [7]（出典：経済産業省，2023）

参考文献

1) 日本化学会（2004）：化学便覧 基礎編 改訂 5 版，丸善，Ⅱ-291-300

2) Shu-Yuan Pan, et al（2015）：An Innovative Approach to Integrated Carbon Mineralization and Waste Utilization: A Review, Aerosol and Air Quality Research, 15: 1072_1091

3) 経済産業省（2021）：カーボンリサイクル技術ロードマップ

4) 経済産業省（2020）：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略会議資料（2020/12/25）

5) 関西電力ホームページ：ゼロカーボンビジョン 2050, https://www.kepco.co.jp/sustainability/environment/zerocarbon/index.html/（2023/6 アクセス）

6) 経済産業省（2023）：カーボンリサイクルロードマップ【別冊 2】産業間連携の事例

7) 経済産業省（2023）：GX 実現に向けた基本方針 参考資料

8) 柴田ら（2021）：ガスの脱炭素化と Energy System Integration －欧州の動向と我が国への示唆－，エネルギー経済，第 47 巻 第 4 号

9) 日立総合計画研究所ホームページ：パワーツーガス（Power to Gas）, https://www.hitachi-hri.com/keyword/k102.html（2023/9 アクセス）

第 4 章　CR 技術の社会実装に向けて

経済産業省は、カーボンリサイクル（CR）とは、「CO_2 を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への再利用とともに、大気中への CO_2 排出を抑制していく」ものとしており、CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）を構成する CCU（二酸化炭素回収・利用）のうち、回収した CO_2 の直接利用および EOR（石油増進回収）を除く技術群として位置付けられている（図 4-1）[1)]。CR を含む CCU は、化石燃料燃焼発電や製鉄、セメント製造等の集中発生源、および大気から直接 CO_2 を回収し、それを燃料、化学製品、建築材料等の炭素含有製品の原材料として利用する技術である。CO_2 を原料とした肥料や炭酸ナトリウム等の製造は、一世紀以上も前から行われている。従来の CO_2 利用では、如何に効率的に最終製品を生産し経済性を確保できるかが重要であったが、温暖化防止の視点では、対策技術としてどの程度 CO_2 削減に貢献できるかが重要となる [2)]。なお、現状における CR の社会実装における主な課題としては以下が挙げられる。

- 多様な技術オプションおよび技術成熟度の低さによる CO_2 削減効果の不透明性
- 燃料合成等における大量のエネルギー消費（再エネ・水素）とコスト高
- 既存製品の規格・基準の市場参入障壁
- 原料となる CO_2 や水素、再エネ等のインフラ整備
- CR の社会的認知・受容性の獲得

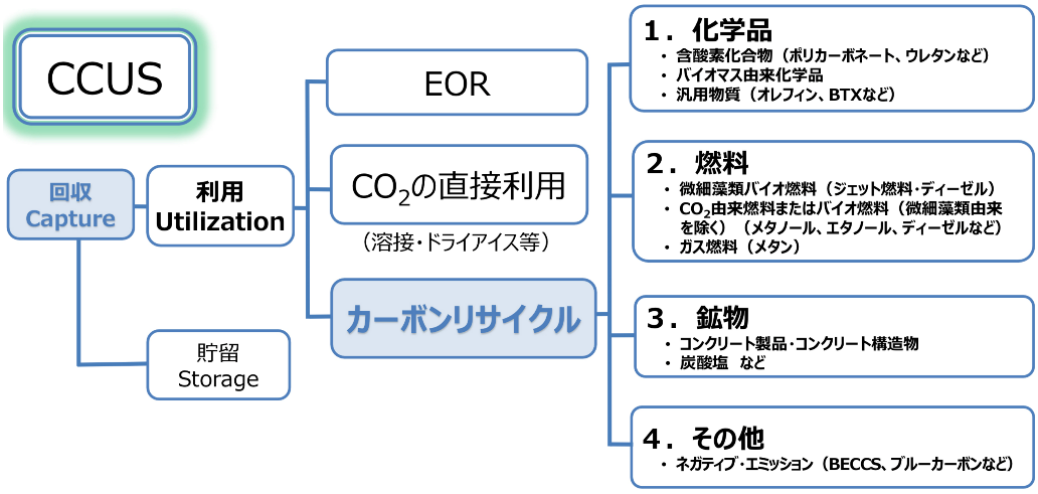


図 4-1　経産省が示すカーボンニュートラル（CR）（出典：経済産業省ホームページ）

4.1　技術開発の促進

4.1.1　CR 技術の概略と主要な技術開発事項

CR 技術は多様な変換経路と最終製品を持つ（図 4.1.1-1）。表 4.1.1-1 に主要な変換経路の特徴を示すが、過大なエネルギー消費に伴うコスト高、再エネ電力等のカーボンフリーエネルギーの調達制限、技術成熟度の低さ等、その普及には多くの課題を抱える。例えば、技術成熟度の低さにより、CO_2 排出削減への貢献が不透明となり、気候変動対策に紐づく資金調達スキームから外れる可能性もあるため、継続的な技術開発と支援が不可欠である。

以下に、主要な変換経路の概要と課題を以下に示す[3)]。

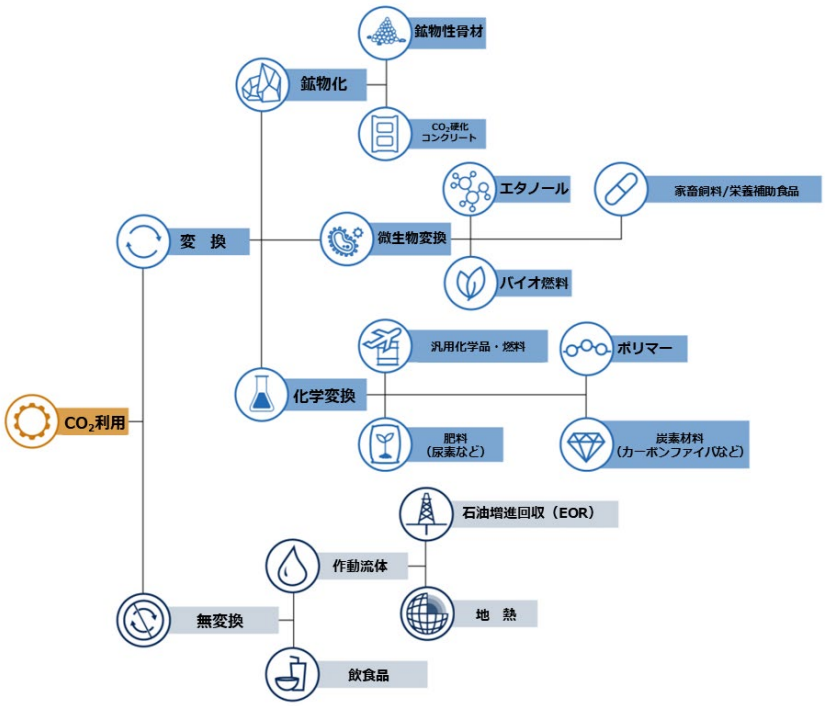


図 4.1.1-1　CO_2 利用の変換経路と最終製品[3)]

表 4.1.1-1　主要な CR 変換経路と特徴[3)]

変換経路	最終製品	利点	課題	技術成熟度
鉱物炭酸化 Mineral Carbonation	鉱物性骨材、硬化コンクリート	長期CO_2固定、低エネルギー消費、排ガス直接利用	低反応速度、反応条件制御（pH、水分量）	商用化初期
水素化 Hydrogenation	燃料（メタン、ディーゼル、ガソリン、ジェット燃料等）、汎用化学品（メタノール、エタノール、蟻酸等）	製品の多様性、市場ポテンシャル大、高製品収率	エネルギー消費（低炭素エネルギー、水素）、CO_2固定期間	商用化（メタノール、メタン）、その他はパイロットあるいは商用化初期
電気化学 Electrochemistry	一酸化炭素、合成ガス、メタノール、蟻酸	製品の多様性、COの生産コスト効率	エネルギー消費（低炭素エネルギー）、CO_2固定期間	研究段階から商用化初期
共重合化 Co-polymerization	ポリカーカーボネート、ポリオール	CO_2固定期間（中庸）、エネルギー消費（中庸）、高付加価値製品	化石燃料起源材料への依存、小規模生産（従来比）、ポリマータイプの開発	商用段階
微生物変換 Microbial Conversion	バイオ燃料、ペットフード、栄養補助食品	高付加価値製品、排ガス直接利用	資源集約型の栽培・加工	一部商用段階、その他研究段階からパイロット

【鉱物性骨材】

石灰岩等の天然素材を人為的に加工した鉱物性骨材は、大量の CO_2 を長期に亘って固定・隔離できる可能性がある。通常、鉱物性骨材の多くは鉱山から産出されている。2020 年時点における世界の市場規模は 450 億トンと推定される。主な用途のひとつは、コンクリートで組成比の 60~80%が鉱物性骨材である。人工的な骨材は、鉱物と CO_2 含有の排ガスや純粋な CO_2 流との反応により形成される。また、フライアッシュ、鉄鋼スラグ、セメントキルンダスト等の産業廃棄物も利用できる。

課題としては、今後、石炭火力発電所、鉄鋼生産の減少により、フライアッシュや鉄鋼スラグ等の原材料として使用される廃棄物の入手が困難になる可能性が挙げられる。また、生産コストが高いことによる既存製品に対する価格競争力の低さがある。さらには、生産した骨材の輸送に伴う CO_2 排出のために、建設廃棄現場で製造する再生骨材と比較して、最終的な CO_2 排出量が多くなり気候便益で劣後する可能性もある。

【CO_2 硬化コンクリート】

CO_2 硬化コンクリートは、長期間において CO_2 を固定・隔離できるとともに、従来のコンクリートと価格競争力を持つ可能性がある。CO_2 はコンクリートミキサーでセメントと直接混合が可能となる。また、CO_2 チャンバー内で養生する場合は、プレキャストコンクリートブロックが最終製品となる。このプロセスでは、排ガスを直接利用できるため、CO_2 の回収と利用を簡素化することができる。CO_2 硬化コンクリートは従来のコンクリートよりも強度が高いとの実証実験結果もある。

CO_2 硬化コンクリートは、現時点では CO_2 削減量の算定方式が確立されておらず、ライフサイクルにおける CO_2 削減効果は不透明である。また、セメント使用にあたり、現在の建築基準を満たさない可能性がある。プレキャストコンクリート製品の場合、市場規模が相対的に小さい。

【汎用化学品・燃料】

特定の炭素含有化学品は、化石燃料に代えて回収した CO_2 を利用することにより、全体的な排出量の削減に繋がる可能性がある。例としては、尿素、メタノール、サルチル酸、エチレン等がある。メタノールやアルコール等のアルコール類は、CO_2 の化学的または微生物学的な変換経路を経て生成することができ、これらを原料として従来プロセスで汎用化学品となる。蟻酸やメタンも特定の汎用化学品のゲートウェイとして機能する。

燃料は市場規模の大きさから、CO_2 利用のポテンシャルも大きいことが期待できる。具体的には、メタン、メタノール、ガソリン、等々がある。電気や水素燃料電池で自動車の脱炭素化が可能な一方で、航空機や船舶等と重量貨物運輸部門では合成燃料への依存が大きくなる。合成燃料は、既存の燃料とほぼ同じ物質特性を有することから、新しいインフラの必要性が低いことが利点である。

課題としては、CO_2 の固定・隔離期間の短さであり、CO_2 排出削減効果に不透明性を与えている。具体的には、汎用化学品は 10 年程度、合成燃料は 1 年未満とされている。排出削減を担保するためには空気直接回収（DAC）による CO_2 の供給が必要となる。また、これらの製造には電気、水素、CO_2 等の大量の投入物の供給インフラが必要となる。

【ポリマー】

CO_2 を原材料としたポリマーは、商用スケールにおいて、従来品よりも安価に製造可能で、CO_2 の固定・隔離期間は数十年から数百年とされる。ポリマーは、プラスティック、発泡材、樹脂等、多くの素材の基礎となっている。ポリオールやポリカーボネートは、製造時に化石燃料に代えて CO_2 を利用することができる。商用例として、ポリウレタンの製造に CO_2 原料のポリオールが使用され、発泡マットレス、低反発スポーツフロア、自動車用発泡体等の最終製品となっている。また、CO_2 原料のポリカーボネートは、従来の製造プロセスと比較して有害な化学物質を使用しないために安全性の高さも指摘される。

課題としては、ポリマーは高付加価値の製品である一方で、市場規模が相対的に小さいことがある。また、ポリマー製造においては、依然として化石燃料ベースの原料への依存が残っている（50%～80%）。さらに、非ポリオール系ポリマーの技術成熟度の低さ（研究開発段階）である。

以上に示された現状と課題から、CR 技術の包括的な技術開発事項としては以下が挙げられる。

・CO_2 を利用したコンクリート等の鉱物化製品の性能実証
・CO_2 を原料とした燃料や化学物質への変換におけるエネルギー消費量の低減
・CO_2 を原料とするポリマーの多様化
・空気直接回収（DAC）技術の開発

4.1.2　各国の技術開発への資金支援事例

CR 技術の多くは、技術成熟度が低いために普及あるいは CO_2 削減効果の見通しが不透明で、技術が成熟する段階までに安定的な技術開発に対する資金支援の枠組みが必要である。以下に日本、欧州、米国における政府の技術支援枠組みを概説する。

【日本：グリーンイノベーション基金】[4)]

経済産業省は、2050 年カーボンニュートラル目標に向けて、令和 2 年度第 3 次補正予算において 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に造成し、官民で野心的かつ具体的な目標を共有した上で、これに経営課題として取り組む企業等に対して、10 年間、研究開発・実証か

ら社会実装までを継続して支援していくこととしている。支援対象は、グリーン成長戦略において実行計画を策定している重点分野で、政策効果が大きく、社会実装までを見据えて長期間の継続支援が必要な領域に重点化して支援するとしている。支援規模の目安は、従来の研究開発プロジェクトの平均規模（200 億円）以上とし、社会実装までを担える、企業等の収益事業を行う者を主な実施主体（中小・ベンチャー企業の参画を促進、大学・研究機関の参画も想定）としている。現在までに採択されたプロジェクトのうち、CCU/カーボンリサイクル関連のものを表 4.1.2-1 に示す。また、表に記載のプロジェクトのうち、「CO_2 を用いたコンクリート等製造技術の開発」について、具体的な採択テーマおよび実施予定者を表 4.1.2-2 に示す。

表 4.1.2-1　グリーンイノベーション基金における CR 関連プロジェクト

プロジェクト名	国費負担額（上限；億円）
CO_2等を用いたプラスチック原料製造技術開発	1,262
CO_2等を用いた燃料製造技術開発	1,152.8
CO_2を用いたコンクリート等製造技術の開発	359.4（コンクリート分野） 208.4（セメント分野）
廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現	検討中
バイオものづくり技術によるCO_2を直接原料としたカーボンリサイクルの推進	1,767

表 4.1.2-2 GI 基金におけるコンクリート・セメント関連プロジェクトの採択結果 [5)]

採択名	実施予定者
コンクリート分野	
革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発	鹿島建設株式会社 デンカ株式会社 株式会社竹中工務店
CO_2を高度利用したCARBON POOLコンクリートの開発と舗装及び構造物への実装	株式会社安藤・間 株式会社内山アドバンス 灰考小野田レミコン株式会社 大阪兵庫生コンクリート工業組合 大成ロテック株式会社 一般財団法人電力中央研究所
コンクリートにおけるCO_2固定量評価の標準化に関する研究開発	国立大学法人東京大学
セメント分野	
CO_2回収型セメント製造プロセスの開発	太平洋セメント株式会社 住友大阪セメント株式会社

【日本：GX 推進法】[6)7)]

日本政府は、産業革命以来の化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換することをグリーントランスフォーメーション（GX）と称し、脱炭素社会の実現を推進するための「GX 推進法」を 5 月の国会で成立させた。GX 推進法

は、先に発表された「GX 実現に向けた基本方針」を実現するために、10 年間で 20 兆円の GX 移行債の発行や、CO_2 の排出に課金する「カーボンプライシング」の導入、150 兆円を超える官民の GX 投資を促進すること等、が示されている。

基本方針では、GX に向けた取り組みの中にカーボンリサイクルが言及されている。具体的には、メタネーション（合成メタン）や合成燃料（e-fuel）のカーボンリサイクル燃料について、技術開発促進や実証・実装フェーズに向けた製造設備への投資等への支援を行うことが示されている。また、CO_2 削減コンクリートについては以下の方針が示されている。

・市場拡大に向けて、CO_2 を削減する効果のあるコンクリート製造設備や炭酸カルシウムを利用する製品等に対して導入支援の実施や需要喚起策の検討を進める。

・製造時のコンクリート内 CO_2 量の評価手法を確立するとともに、全国で現場導入が可能な技術から国の直轄工事等において試行的適用を進め、今後技術基準等に反映しながら現場実装につなげる。

【欧州：Innovation Fund】[8)]

欧州委員会は、2019 年 2 月、革新的なクリーンエネルギープロジェクト支援を目的とした Innovation Fund の立ち上げを発表した。革新的な低炭素技術の商業的実証支援を通して、脱炭素化や気候中立に貢献する産業ソリューションの欧州市場への投入を促進することを目的としている。同基金は、EU の排出権取引制度（ETS）の第 4 フェーズ（2021～2030 年）の下で導入されたもので、財源は、EU ETS からの収入である。より具体的には、2020～2030 年で EU ETS の下で取引される 4.5 億排出枠分となり、現在の炭素取引価格水準（EUR 50 / tCO_2）に基づくと、250 億ユーロの規模となる。支援対象は、クリーンエネルギー促進に向けた大規模実証プロジェクト（予算規模が 750 万ユーロ超のもの）および小規模実証プロジェクト（予算規模が 750 万ユーロ以下のもの）である。具体的な分野は以下の通りである。

・エネルギー集約型産業における革新的な低炭素技術およびプロセス

・炭素回収・利用（CCU）

・炭素回収・貯留（CCS）

・革新的な再生可能エネルギー発電

・エネルギー貯蔵

【米国：Carbon Utilization Program】[9)10)]

米国エネルギー省（DOE）は、CO_2 を環境負荷がなく経済的に価値ある製品に転換するための広範な技術の研究、開発、実証を支援する Carbon Utilization Program（CUP）を立ち上げて、2050 年までに脱炭素経済を実現するための低炭素サプライチェーンを可能にすることを目標としている。CUP プログラムでは、CO_2 や CO を原料とし

て付加価値の高い製品を生産するための新しい材料、装置、プロセスの開発を目指す。CO_2 の変換経路は、藻類による CO_2 の取り込み、触媒による変換、無機化などが含まれる（図 4.1.2-1）。製品としては、燃料、化学物質、農産物、飼料、建築材料、等である。また、これらの製品のライフサイクルにおける環境性や経済性の分析についても支援対象としている。支援総額は、約 3 億ドルとなっている。

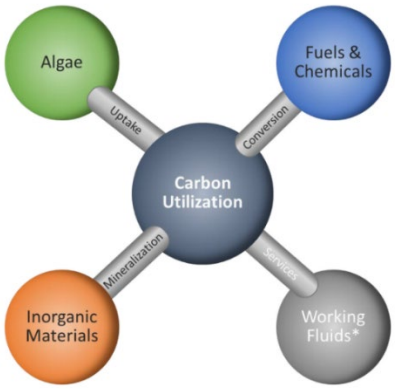


図 4.1.2-1　DOE Carbon Utilization Program の CO_2 変換経路 [9)]
（出典：NETL ホームページ）

4.2　ビジネスモデルの構築

CR は、概ね既存のビジネスモデルが存在しない新たな市場を対象とする技術と位置付けられる。そのため、将来的な社会実装を見通すためには、バリューチェーンを明確にしつつ新たなビジネスモデルの構築が必要となる。CR 技術の社会実装における主要な課題を表 4.2-1 に示す。

CR 技術の多くは研究開発の初期段階にあることから、ビジネスモデルの構築にはバリューチェーン全体に及ぶ政策的な支援と将来的な市場拡大の見通しが必要である。IEA は、発生源から回収した CO_2 を原料とした製品あるいはサービスの将来的な市場規模に影響を与える要因を、拡張性、競争力、気候便益とし以下のように説明している [12]。

表 4.2-1　CR 技術の社会実装における課題 [11]

	社会実装の課題
技術	**インテグレーションリスク**：CR技術導入による製造プロセスや最終製品の品質への影響のリスク **技術性能**：技術成熟度
政策	**政策の不確実性**：包括的な政策フレームワークとビジネスモデルの欠如 **炭素価格の不確実性**：価格の不確実性、炭素制約による産業移転（炭素リーケージ）
経済性	**資本コスト（CAPEX）の不確実性**：技術成熟度の低さ、コスト評価の不確実性、再現性の低さ **運用コスト（OPEX）の不確実性**：将来燃料コストの不確実性、プラントエネルギー消費の不確実性、プラント寿命の不確実性 **リスク認知**：投資家のリスク許容度の不確実性 **収益モデルの欠如**：低CO2価格、CO2利用機会の不確実性 **需要の不確実性**：製品の多様性による需要の不確実性 **競争力**：コスト増加による競争力の低下
クロスチェーン	**プロセス間インテグレーション**：ステークホルダー毎の特有リスク、CO2責任の移管 **輸送・貯留インフラの可用性**：インフラ整備の不確実性、インフラ整備競争下における資産座礁化 **輸送・貯留コストの不確実性**：輸送・貯留インフラ独占によるコスト上昇

【拡張性；Scalability】

CR 技術によって生産される製品の潜在的な市場は供給側と需要側の双方に依存する。需要は、地域や製品の種類によって大きく異なる。CR 製品の中には燃料のように大規模な市場で取引されるものと、ポリマーのようにニッチな市場をターゲットとするものがある。従来品に対する既存の需要に加え、CR 製品が生産コストの削減に優れた特性を持つ場合は、新たな需要を創出する可能性が大きい。供給側では、低コストの再生可能エネルギー、CO_2、水素、その他の原材料の利用における制約が、市場拡大のスピードと規模を決定する。これには、水素や CO_2 を輸送するインフラの利用も含まれる。供給側の制限も需要と同様に地域や製品の種類によって大きく異なる。

【競争力；Competitiveness】

CR 製品の競争力は、代替製品との相対的なコストで決まる。コストに影響を与える要因としては、採用技術、投入エネルギー量、CO_2 その他の原材料のコストがあり、各要素が総コストに占める割合は製品によって異なる。採用技術は製品毎に異なるが、CO_2 や水素の入手にかかるコストは、複数の製品に関連する。

CO_2 と水素を原料とする燃料や化学製品が気候変動の緩和に貢献するためには、利用する水素を CO_2 排出の少ない方法で製造する必要がある。現在の水素の主要な製造ルートは、天然ガスを原料とした水蒸気メタン改質（SMR）であるがこれには CO_2 の排出を伴う。SMR に CCS を適用することで排出は制限できるが、結果として製造コストを押し上げるとともに、適切な貯留サイトが存在することが必須となる。また、再生可能エネルギーを利用した水電解でも水素を生成することはできるが、同様にコスト高となる。クリーンな水素の競争力に影響を与えるコストは、主に設備容量とガスあるいは電気料金に依存する。短期的には、世界のほとんどの地域では、化石燃料を原料とする水素製造が最もコスト競争力のある選択肢と考えられるが、再生可能資源に恵まれているが天然ガスの輸入に依存している国では、水電解による水素製造が選択肢になる可能性がある。国内のガスや石炭資源が安く、CO_2 貯留が可能な地域では、SMR が選択肢になる可能性がある。価格と資源の利用可能性に加えて、水素の輸送コストも重要となるが、いずれにして、将来的な水素価格は、地域によって大きく異なる。

CO_2 の回収にかかるコストは、排出源の種類によって大きく異なる。CO_2 回収に係る市場は拡大することが予想されるが、それに伴ってコストが低減して行くことが期待できる。CR における相対的に規模の小さい回収においては、大規模なプラントでの大容量の回収と比較してコストが増加する可能性がある。回収された CO_2 の CR 事業者への輸送にかかるコストは、距離や輸送手段によって大きく異なる。DAC の大きな利点としては、利用可能なエネルギー源があれば、設置する場所の制約が小さく、CO_2 輸送の必要性が小さいことである。一般的に CO_2 利用プラントに近い場所での、高濃度 CO_2 処理ガスからの回収が最も安価に CO_2 を供給できる一方で、低コストの CO_2 供給源や輸送インフラがない場合は、より低濃度 CO_2 処理ガスからの CO_2 を使用する選択を迫られる場合もある。CO_2 の価格は、回収および輸送のコストだけでなく、地域の市場環境や気候政策にも影響される。例えば、地域の CO_2 供給不足が価格を押し上げ、CR 事業者のコストを増加させる可能性がある。炭素税等の気候政策の導入も CO_2 価格に影響を及ぼす。

【気候便益；Climate benefits】

CO_2 を原料とした製品あるいはサービスの気候変動の緩和効果（気候便益）は、主にライフサイクルにおける CO_2 排出量の多い同等の製品、サービスを置き換えることにより生ずる。CR 製品の気候便益を決定するためには、既存製品とのライフサイクルにおける CO_2 排出量の比較を可能とするアプローチ（LCA）が必要である。原則として、LCA の境界は、上流排出（燃料採取、CO_2 回収、精製、輸送）、利用あるいは変換プロセスに関連する排出、下流排出（CR 製品のさらなる加工、消費、廃棄物処理）を含むバリューチェーン全体をカバーする必要がある。

CR がもたらす潜在的な気候便益に関する現時点における知見には限界がある。LCA は、結果や結論にばらつきがあるため、政策立案者や消費者が、CR が実質的な気候変動の緩

和策であることを判断する際の障壁になる場合がある。気候便益は、CR プロセスへの投入エネルギーの炭素強度、変換技術、CO_2 の供給源等、状況によって大きく異なること、LCA に関する方法論や CR 技術の性能に関するデータが限定されること等により現状では不確実性が大きい。

上記を含む、CR 製品の将来的な市場拡大の要因を表 4.2-2 に示す。

表 4.2-2　CR 製品の将来的な市場拡大要因 [12)]

市場拡張要因	詳　細
拡張性 **Scalability**	● 供給制限 ・ 主要投入物の可用性：CO_2、H_2、低炭素エネルギー、等 ・ インフラ：CO_2、H_2の輸送 ● 製品の需要
競争力 **Competitiveness**	● 採用技術のコスト ● 投入材のコスト：CO_2、H_2、低炭素エネルギー、等 ● 製品のコスト ● 市場価格
気候便益 **Climate benefits**	● CO_2回収源 ● 代替製品 ● エネルギー投入量 ● 製品へのCO_2固定時間

CR 製品毎が持つ機能あるいは価値だけでなく、より大きな生産システムへのサービスとしての CR という観点もビジネスモデル構築においては必要となる。具体的には、

・ 変動性再生可能エネルギーの貯蔵

・ 電気以外のエネルギー媒体の代替提供（合成燃料等）

・ 既存流通インフラの活用による運輸部門における脱炭素化の促進

等が挙げられる [13)]。

4.3　CR 事業の立地、輸送インフラの整備

CR 事業における CO_2 の輸送インフラは、回収地点から利用地点まで CO_2 を移動させる機能を持つ必要がある。CO_2 輸送には、パイプライン、船舶、列車、トラック等、複数のオプションが存在する。このうち、パイプラインと船舶が最も拡張性が高く、輸送コストが低い選択肢となる。

複数の排出源で回収された CO_2 の輸送が可能なマルチユーザのパイプラインネットワークは、CR 事業の地理的な拡張と経済的なスケールメリットをもたらす。特に、小規模な事業者の CR への参入障壁を低くする可能性がある。CO_2 輸送に関連したプロジェクト事例として、カナダアルバータ州の Alberta Carbon Trunk Line（ACTL）がある。州内産業分野の脱炭素化を目指した CO_2 輸送インフラ整備（パイプライン）を中心としたプロジェクトで 2020 年 6 月に運用が開始されている。ACTL のシステムは、産業プラントから回収した CO_2 を石油増進回収に供給している。現在は、石油精製施設と肥料製造施設で回収が行われ、全長 240km のパイプラインで年間 160 万トンの CO_2 が輸送されている。このシステムの輸送能力は年間 1,460 万トンであり、将来的に他の施設もアクセス可能なように冗長設計となっている [14]。マルチユーザを想定した代表的な CO_2 輸送インフラ開発プロジェクトを表 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 マルチユーザを想定した CO_2 輸送インフラ開発プロジェクト

プロジェクト	国・地域 事業者	概要	運用開始
Alberta Carbon Trunkline[15]	カナダアルバータ州 Enhance Energy	• 複数の産業部門発生源の回収CO2を石油増進回収（EOR）に利用するためのC輸送パイプライン（240km長） • 最大年間1,460万トンのCO2を輸送可能 • 合成燃料製造へのCO2供給も予定	2020
Midwest Carbon Express[16]	米国中西部 Summit Carbon Solutions	• 米国中西部の複数のエタノール工場で回収されたCO2をノーズダコタ州の貯留サイトへ輸送するパイプライン（3,360km長） • 最大31のエタノールプラントからCO2を回収・輸送予定	2024
Belgium-Norway Trunkline[17]	ノルウェー/ベルギー Equinor/Fluxys	• ベルギーとノルウェーを結ぶ北海における大規模なCO2輸送インフラプロジェクト • ノルウェー大陸棚にあるCO2貯留サイトとベルギーを海底パイプラインで結ぶ（1,000km長） • ベルギー側で陸上パイプラインに接続	2025 （投資決定）
Delta Corridor[18]	オランダ ロッテルダム港湾局及び Shell, Bp等の企業連合	• ロッテルダム港とドイツフランクフル地方を結ぶCO2およびH2の輸送インフラプロジェクト • オランダとドイツ内陸部の産業クラスタを接続	2026

船舶による CO_2 輸送は小規模（約 2,000 トン以下）で実証されているが、現時点で大規模での実証事例はない。船舶による輸送は、温度や圧力などパイプライン輸送と異なる

CO_2 管理が求められる。さらに、船舶輸送には、積み下ろしや中継地点としての管理調整が可能なターミナルも必要となる。現在、ベルギーの Antwerp 港やポーランドの Gdansk、スウェーデンの Gothenburg 港等で CO_2 ターミナルが開発中である[19)]。

CR 事業の立地、輸送インフラの整備を促進するために考慮すべき事項を以下に挙げる[20)]。

【CO_2 の地中貯留との組合せ】

CO_2 貯留サイトに近接あるいはアクセス可能な立地とすることで、CR への CO_2 供給の柔軟性が確保できるとともに、余剰 CO_2 を貯留することで気候便益（CO_2 の排出削減効果）が担保される。また、CO_2 輸送におけるスケールメリットの獲得機会の増加に繋がる。

【CCUS ハブ・クラスタへの参入】

欧州や北米等の CCUS の先行国では、複数発生源を持つ地域（産業クラスタ）の CO_2 排出削減、スケールメリットによる輸送・貯留コストの低減、インフラ投資へのリスク低減、商業的なシナジー創出、等を期待した CCUS ハブ・クラスタの構想・開発が進んでいる。CR 事業としてこれらの開発に参入することで、CCUS ハブ・クラスタのメリットを享受できる可能性がある。

【法規制整備】

輸送インフラ整備においては、政府は財政的な支援とともに、法規制整備あるいは制度設計における主導的な役割が求められる。具体的には、共有インフラへのアクセス要件の規定、各種許認可の規定、責任分担、コスト負担の枠組み、等が必要となる。

【利害調整・社会的受容性の獲得】

CR 事業として CO_2 貯留の伴う輸送インフラの利用を想定する場合、洋上風力、漁業関係者、地域住民、等の各種ステークホルダとの利害調整が必要とともに、公的支援を受ける場合、CO_2 削減対策としての CR 技術の社会的な理解と認知の醸成が不可欠となる。

【時間的制約】

パリ協定の締結とともに世界全体で共有されている排出削減目標である 2050 年あるいはそれ以降のネットゼロ（あるいはカーボンニュートラル）を達成するためには、CO_2 輸送のインフラ整備は CO_2 回収プロジェクトより先、あるいは少なくとも平行して進行する必要がある。

4.4　法規制およびインセンティブの設計

4.4.1　標準化・LCA 評価[6)]

新興技術を多く含む CR の普及のためには、安定した法規制の枠組み構築が不可欠である。特に、市場拡大に必須な CR 製品の標準化と気候便益に関する定量化（LCA 評価）のガイドライン整備は重要な課題である。

CR 技術によって生産される製品は、場合によっては既存の基準に適合しない可能性がある。これらの基準の多くは規定的なもので、例えば、コンクリート混合物に含まれる原材料を特定の割合で使用することが求められる場合、CO_2 を用いて硬化させたコンクリートが基準を満たさない可能性もある。藻類バイオ燃料は、米国の再生可能燃料基準（RFS; Renewable Fuel Standard）プログラムでは先進バイオ燃料として規定されているが、非生物起源の CO_2 から生成される合成燃料は非適格である。そのため、今後は特定の指標やプロセスでなく、求めるべき結果に基づく技術中立的な基準の構築が望まれる。

CR 製品の気候便益を判断する方法としての LCA 評価のガイドラインについても現時点では十分に整備されていない。LCA 評価は、CR プロセスによる正味の CO_2 排出を測定するためのフレームワークとなる。国際標準化機構（ISO）14000 シリーズによる LCA 評価指針は、製品の中に CO_2 を保持するといった CR 製品特有の機能を適切に考慮していないケースがあることが指摘されている。また、LCA 評価のガイドラインの中には、CR 製品の CO_2 削減の条件として、CO_2 の保持期間の条件を 100 年としている場合がある。建材のように、保持期間が 100 年を超えることが期待できる製品には影響しないが、合成燃料等は使用とともに CO_2 が再放出するため適用外となる。今後、多種多様な CR 製品が市場に登場することが予想されるが、如何に実態に即したガイドラインを構築するかは大きな課題である。LCA 評価については、明確な方法論的ガイドラインと透明性のあるデータセットに基づくプロセスで行われることが必須となる。

4.4.2　インセンティブ施策

法規制の整備とともに、インセンティブの設計も新興技術を多く含む CR の普及には不可欠である。表 4.4.2-1 に CR 普及のインセンティブとなり得る施策を示す。具体的な事例として、カナダではグリーン調達政策のもと、政府関連の建設プロジェクトにおいてコンクリート等の CO_2 排出フットプリントの開示と基準値に対する削減を求める「建設業における二酸化炭素の排出に関する基準」が 2022 年に導入されている[21)]。

排出基準に関連して、EU では運輸部門の CO_2 排出削減目標達成において、再生可能エネルギー指令（RED II）で定義される「再生炭素燃料」の利用を推奨している。再生炭素燃料は、再生不可能な液体や固体の廃棄物（プラスチック等の化石燃料起源廃棄物）、あるいは再生不可能な廃棄物処理ガスや排ガスから製造される液体や気体から生産される燃料で、従来の化石燃料起源の液体燃料と比較して 70%以上の排出削減効果があ

るものと定義されている[22]。また、2020年までにノルウェー、スウェーデン、フランスで航空機燃料にそれぞれ0.5%、1%、1%の低炭素燃料を混合することを義務化している[23]。

規制とそれに伴うクレジット付与の例として、カリフォルニア州は、州域内の運輸用燃料群に起因するCO_2排出削減を目的として低炭素燃料規則（LCFS; Low Carbon Fuel Standards）を制定し、燃料生産者に対してガソリン、ディーゼル、およびそれらの代替燃料に関するライフサイクル全体の炭素強度を規定している。これにより、ベンチマーク基準（ガソリン）より低い炭素強度の燃料を販売する燃料生産者にはクレジットが付与され、高い燃料強度の燃料を販売する生産者はクレジットが欠損する。ちなみに、2020年のクレジットの取引価格は約200米ドル/tCO_2であった[24]。

米国では、2008年にCCUS事業に対する税額控除が、内国歳入法（Internal Revenue Code）のセクション45Qに規定され発効された。2018年には、この規定の改正により適用範囲が拡大され、さらに、2022年8月にバイデン政権のもとインフレ抑制法（Inflation Reduction Act）が成立し、45Qが強化された[10]。表4.4.2-2に45Qの強化内容を示す。45Qは、企業の納税義務を軽減するために使用されるか、納税義務がない場合は、CO_2削減を意図する企業に譲渡されるか、さらにはタックス・エクイティ市場（税額控除売買市場）で取引される[25]。

表 4.4.2-1　CR 普及のためのインセンティブ施策の例

施　策	概　要
炭素税	CO_2排出量に対して税金を課す仕組みで、事業者は自らのCO_2排出量に応じた税額を支払う必要があり、その課税額を抑えるために排出削減策としてのCRを導入するインセンティブとなる可能性がある
排出量取引	事業者はそれぞれに割り当てられた排出枠内に排出量を抑えるために排出枠の購入が必要となる一方で、排出枠よりも排出量が小さい場合には、余った排出枠分を他の事業者へ販売することができる。排出枠の購入費用を抑えること、余った排出枠を販売することによる利益を得られることが、CO_2削減策としてCRを導入するインセンティブとなる可能性がある
排出基準/クレジット	規制としてCO_2排出量に上限を定めることで、排出量の削減を目指すもので、事業者の活動全体や保有する設備単位での活動に対してCO_2排出量の上限が課され、事業者は課される排出基準を満たすために、効率化や生産手段の変更を行う必要が生じる。また、場合によっては基準を満たすことでクレジットが発行され、CR導入のインセンティブとなる可能性がある
公共調達	相対的にCO_2排出の少ない製品を政府等の公共機関が優先的に調達することで、コスト競争力や認知度に劣るCR導入のインセンティブになる可能性がある
建設・運用補助金	政府が、排出削減という社会的な便益が生じることからCRプロジェクトの費用の一部を負担することにより、運営する事業者の初期段階の障壁を低くすることができ、CR導入のインセンティブとなる
研究・開発資金支援	研究・開発資金を支援することによって、商用化レベルに達していない技術の成熟度を高めることを目的とするもの。技術的な課題を解決するための研究開発や、使用例の少ない技術の実証例蓄積につながり、関連する技術の成熟度を高めることで、導入の障壁を低くすることを意図する施策
税制優遇	税制上の優遇措置（税額控除、免除、減価償却）によって、事業者の支払い税額が削減されることで、建設および開発のリスクを軽減するもの
債務保証	融資を得られにくいプロジェクトに対して、政府が債務保証をすることにより、プロジェクト資金の調達が容易になりCR導入のインセンティブとなる

表 4.4.2-2　米国の CCUS プロジェクトに対する税額控除の概要 [25)]

	改正前（2018年）	改正後
控除額 EORおよび**CO_2産業利用**	**～$35/t$CO_2$**	**$60/t$CO_2$**
CO_2貯留	～$50/t$CO_2$	$85/t$CO_2$
空気直接回収(DAC)＋ EORおよび**CO_2産業利用**	**～$35/t$CO_2$**	**$130/t$CO_2$**
空気直接回収(DAC)＋ CO_2貯留	～$50/t$CO_2$	$180/t$CO_2$
最低CO_2回収量	発電：50万tCO_2/年 産業：10万tCO_2/年 DAC：10万tCO_2/年	発電：18,800tCO_2/年 産業：12,500tCO_2/年 DAC：1,000tCO_2/年
支払い方法（12年間）	税額控除	• 現金支払い（5年）＋税額控除（7年） • 税額控除（12年）
適用期限	2026/1/1　建設開始	2033/1/1　建設開始

参考文献

1) 経済産業省ホームページ：カーボンリサイクルについて，
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/

2) 下田昭郎（2021）：CCU の CO_2 排出削減対策としての位置付け-国外事例と電気事業への含意-，電力中央研究所報告 V20003，2021 年 3 月

3) United States Government Accountability Office（2022）：Technology Assessment: Decarbonization, Sep. 2022.

4) 経済産業省ホームページ：グリーンイノベーション基金，
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html

5) NEDO ホームページ：「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」に係る実施体制の決定について，
https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100241.html

6) 経済産業省ホームページ：「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律案」が閣議決定されました，
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210004/20230210004.html

7) 経済産業省ホームページ：「GX 実現に向けた基本方針」が閣議決定されました，
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html.

8) EU 委員会ホームページ：https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund_en.

9) National Energy Technology Laboratory ホームページ：
https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-07/Program-155.pdf.

10) US Department of Energy ホームページ：
https://www.energy.gov/fecm/carbon-utilization-program.

11) H. Muslemani et al.（2020）：Business Model for Carbon Capture, Utilization and Storage Technologies in the Steel Sector: A Qualification Multi-Method Study, Process, 8(5)

12) IEA（2019）：Putting CO2 to Use -Creating value from emissions

13) European Commission（2018）：Novel carbon capture and utilization technologies

14) Global CCS Institute ホームページ：https://www.globalccsinstitute.com/

15) Enhance ホームページ：https://enhanceenergy.com/actl/.

16) AGWEEK（2021）：World's largest carbon capture pipeline aims to connect 31 ethanol plants, cut across Upper Midwest, December 06, 2021,
https://www.agweek.com/business/worlds-largest-carbon-capture-pipeline-aims-to-connect-31-ethanol-plants-cut-across-upper-midwest.

17) Equinor ホームページ：https://www.equinor.com/news/fluxys-and-equinor-launch-solution-large-scale-decarbonisation.
18) Shell ホームページ：https://www.shell.nl/media/persberichten/2022-media-releases/delta-corridor-links-industry-with-clean-h2-and-offshore-ccs-sol.html.
19) IEA（2022）：CO2 Transport and Storage, Sep. 2022.
20) IEA（2022）Carbon Capture, Utilization and Storage, Sep. 2022.
21) mcmillan ホームページ：New Implications for the Construction Industry and Beyond, https://mcmillan.ca/insights/publications/greening-procurement-in-canada-new-implications-for-the-construction-industry-and-beyond/.
22) Bellona ホームページ：Joint briefing: Recycled Carbon Fuels in the Renewable Energy Directive, https://bellona.org/publication/joint-briefing-by-zero-waste-europe-and-bellona-recycled-carbon-fuels-in-the-renewable-energy-directive.
23) Argus（2020）：European makes legislative push for aviation transition, Sep. 2020.
24) Global CCS Institute（2019）：THE LCFS and CCS Protocol: An Overview for Policymaker and Project Developer, June, 2019.
25) Aker Carbon Capture（2022）：US House of Representatives pass Inflation Reduction Act, effectively enabling the biggest CCUS market pre-2030 to materialize!.
（最終アクセス日：2023/6/14）

第５章　おわりに

CR 分科会は、土木学会エネルギー委員会の新技術・エネルギー小委員会のもと立ち上げられ、産業技術総合研究所の坂西欣也を主査とし、電力会社、建設会社、大学・研究機関などの主に土木技術者からなる委員で構成し、経済産業省資源エネルギー庁および新技術・エネルギー小委員会からオブザーバ参加して頂いた。委員名簿を表 5-1 に示す。

分科会活動としては、第 1 回の分科会を 2021 年 7 月 12 日に開催したのち、表 5-2 に示すように 3 ヶ月に 1 回程度の頻度で 10 回開催した。分科会の前半では委員・オブザーバならびに外部の学識経験者による講演や文献調査により CR 技術等に係る情報収集や課題抽出を行い、後半からは調査結果をもとに報告書の執筆を進めた。第 6 回の 2022 年 9 月 1 日には川崎火力発電所（JERA）を訪問し、世界最高水準の熱効率を誇るガスコンバインドサイクルの発電システムを視察した。

表 5-1　分科会委員名簿

区分	氏名	所属・役職	備考
主査	坂西　欣也	（国研）産業技術総合研究所 イノベーション人材部 シニアマネージャ	
委員兼幹事	松本　匡司	電源開発（株）経営企画部 経営企画室 国内CCS事業化タスク 総括マネージャー	
委員	大城　朝陽	沖縄電力（株）発電本部 発電部 発電運用グループ マネージャー	～2022年6月
	石川　要	沖縄電力（株）発電本部 発電部 発電運用グループ マネージャー	2022年7月～
	大西　徳治	西松建設（株）土木事業本部 土木営業第二部 担当部長	
	大山　寛夫	鹿島建設（株）土木管理本部 プロジェクト推進部 部長	
	加藤　誠司	中部電力（株）技術開発本部 電力技術研究所 土木グループ 研究主査	
	北垣　亮馬	北海道大学大学院 工学研究院 建築都市部門先端空間性能分野 建築材料研究室 准教授	
	参納　千夏男	北陸電力（株）土木建築部 土木技術チーム統括 課長	
	澁谷　武弘	（株）JERA　O&M・エンジニアリング運営統括部　土木・建築部 土木・建築総括ユニット　ユニット長	
	清水　規昭	清水建設(株)土木営業本部 営業部長	～2022年3月
	髙木　真	清水建設(株)土木営業本部 営業部長	2022年4月～
	下田　昭郎	（一財）電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門 研究参事	
	高木　猛志	東北電力（株）土木建築部（土木建築業務） 副長	
	坪田　裕至	中国電力（株）電源事業本部 再生可能エネルギー・土木総括グループ 副長	
	松本　由之	（株）安藤・間　営業本部 エネルギー事業営業部長	
オブザーバ	土屋　博史	経済産業省 資源エネルギー庁 長官官房 カーボンリサイクル室 室長	～2022年6月
	羽田　由美子	経済産業省 資源エネルギー庁 資源・燃料部 燃料環境適合利用推進課 課長	2022年7月～
オブザーバ （新技術・エネルギー小委員会委員長）	山田　安秀	清水建設（株）　執行役員　コーポレート企画室　環境・エネルギー担当	
オブザーバ （新技術・エネルギー小委員会幹事）	澄川　洋平	東京電力ホールディングス（株）　技術戦略ユニット　土木・建築統括室 企画グループ　チームリーダー	～2022年8月
	増田　雅之	東京電力ホールディングス（株）経営技術戦略研究所 技術開発部 環境・エネルギーエリア スペシャリスト	2022年6月～

※ 委員の氏名及び所属・役職は、第10回分科会（2023年9月28日）時点のものを表記

※ 委員の交代があった場合、交代前の委員の所属・役職は交代時点のものを表記、交代後の委員の所属・役職は上記の通り

表 5-2　分科会の開催実績

	開催日	実施概要
第1回	2021年7月12日	講演：カーボンリサイクル政策について（土屋オブザーバ） 講演：2050年CNに向けた電気事業者の取り組み（下田委員）
第2回	2021年9月1日	経済省公募案件（カーボンリサイクル関連プロジェクト（コンクリート・セメント分野）の研究開発・社会実装の方向性）に対する意見・コメント
第3回	2021年11月15日	講演：CO2-SUICOMについて（鹿島建設㈱ 関様） 講演：CO2-TriCOMについて（中国電力㈱ 香川様） 講演：CCCについて（北垣委員） 文献調査：カーボンニュートラルに係るコンクリート技術等について（松本幹事）
第4回	2022年2月7日	報告書目次（案）及び３班体制による調査・報告書の進め方の議論
第5回	2022年6月16日	講演：GHGの削減貢献量とISOのカーボンニュートラリティ（一般社団法人 日本LCA推進機構 稲葉理事長様） 調査進捗確認
第6回	2022年8月31日 ～9月1日	講演：カーボンネガティブコンクリート CO2-SUICOM（大山委員） 調査進捗確認 現場視察：川崎火力発電所（JERA）
第7回	2022年11月25日	調査進捗確認
第8回	2023年2月7日	調査進捗確認
第9回	2023年6月22日	ドラフト報告書の確認・議論
第10回	2023年9月28日	報告書（案）の確認・議論

本報告書において、第 1 章にて CR 分科会の位置付けや目的及び活動方針を示したのち、第 2 章では 2050 年カーボンニュートラルに向けた国内外の CR の動向について、第 3 章ではコンクリート・セメント分野における CO_2 吸収・利用や CO_2 低減に係わる技術を中心とした CR に係わる土木技術等について、第 4 章では CR 技術の社会実装に向けた諸課題への取組みについてとりまとめた。巻末資料では、第 3 章で調査したコンクリート・セメント分野における CO_2 対策技術の詳細を整理した。

今後、カーボンニュートラル社会の実現に向け、カーボンリサイクルを含めた様々な事業が展開される中で、土木分野での貢献を図っていく際に本報告書が活用されその一助となれば分科会として大きな喜びである。

謝 辞

本活動を行うにあたり多くの方々のご支援・ご指導を頂いた。経済産業省資源エネルギー庁からはオブザーバとしてご参加頂き、我が国のカーボンリサイクルへの取組みに係る貴重な資料提供や助言等を頂いた。一般社団法人 日本建設業連合会からは委員としての参加に加え、コンクリート・セメント分野における最新かつ詳細な CO_2 対策技術の資料を提供して頂いた。また、一般社団法人 日本 LCA 推進機構の稲葉理事長、中国電力㈱香川氏、ならびに鹿島建設㈱関氏から貴重な講演を頂いた。ここに感謝の意を表する。

巻末資料
コンクリート・セメント分野の CO_2 対策技術紹介

No.	CO_2 対策技術	紹介した企業・団体
①	CO_2-SUICOM	鹿島建設㈱
②	CO_2-TriCOM	中国電力㈱
③	DAC コート	清水建設㈱
④	強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート	東京電力 HD㈱
⑤	カーボンキュア（CarbonCure）	三菱商事㈱
⑥	T-Carbon Mixing	大成建設㈱
⑦	O.C.O Technology Limited	㈱神鋼環境ソリューション 三菱商事㈱
⑧	Blue Planet	三菱商事㈱
⑨	CCC（C^4S プロジェクト）	東京大学・北海道大学
⑩⑮㉔㉖	T-*e*Concrete シリーズ	大成建設㈱
⑪	クリーンクリート N	㈱大林組
⑫	バイオ炭コンクリート	清水建設㈱
⑬	リグニンクリート	㈱大林組
⑭	ECM コンクリート	鹿島建設㈱
⑯	スーパーグリーンコンクリート	前田建設工業㈱
⑰	LHC（ローカーボンハイパフォーマンス コンクリート）	㈱安藤・間
⑱	BBFA 高強度コンクリート	㈱安藤・間
⑲	アッシュクリート	㈱安藤・間
⑳	ジオポリマー（ジオポリー）	西松建設㈱
㉑	AAM コンクリート	西松建設㈱
㉒	現場打設型ジオポリマー「ポリマークリート」	㈱大林組
㉓	サスティンクリート（Sustain-Crete）	三井住友建設㈱
㉕	クリーンクリート	㈱大林組
㉗	スラグリート	戸田建設㈱

CO_2-SUICOM　鹿島建設㈱　①

（1）技術概要

CO_2-SUICOM（CO_2-Storage and Utilization Infrastructure by COncrete Materials）は、産業副産物を活用するとともに、強制的な炭酸化（炭酸化養生）によって大量の CO_2 をコンクリート中に吸収させた、カーボンネガティブを実現できる環境配慮型コンクリートであり、中国電力（株）、鹿島建設（株）、デンカ（株）およびランデス(株)が共同開発したものである。

① 産業副産物利用によるセメント使用量の低減

コンクリート製造時の CO_2 排出量はその大部分がセメント由来であるため、セメント使用量の低減がコンクリートの CO_2 排出量を削減するための有効な手段となる。CO_2-SUICOM では、セメント使用量を約 1/3 に低減し、その他に産業副産物である高炉スラグ微粉末や、産業副産物などを原料として製造する特殊混和材 γ-C_2S（γ-2CaO・SiO_2）などを使用する。特殊混和材 γ-C_2S は基本的にはセメントと同じ成分であるが、水と反応せず CO_2 と反応して硬化する性質を有する。また、CO_2-SUICOM で使用する γ-C_2S は、産業副産物である副生水酸化カルシウムを用いるとともに、セメントと比較して低温で焼成する。そのため、製造時の CO_2 排出量は普通ポルトランドセメントの約 1/5 であり、セメント代替材料として CO_2 削減に有効である。

② 炭酸化養生による CO_2 の吸収

CO_2-SUICOM は特殊混和材 γ-C_2S を配合することにより、CO_2 をコンクリート内部に効率的に吸収・固定できる。吸収する CO_2 の供給源の一例として火力発電所の排気ガスが挙げられる。火力発電所の排気ガス（CO_2 濃度は 10%～20%程度）を利用する場合、発電所内に養生槽を設置し、脱型したコンクリートを搬入した後に発電所からの排気ガスを引き込む。効率的に CO_2 を吸収・固定できるよう養生槽内の温度・湿度を一定範囲で管理し、炭酸化養生を行う。

図 1.1　発電所内に設置した養生槽の例

図 1.2　養生槽への CO_2-SUICOM 製品搬入状況

（２）CO_2 削減量および適用実績

① CO_2-SUICOM の CO_2 削減量と CO_2 吸収量

歩車道境界ブロックの一般製品と CO_2-SUICOM の CO_2 排出量の比較例を図 1.3 に示す。セメント使用量を通常の約 1/3 に低減し、産業副産物である高炉スラグ微粉末や石炭灰、および前述した特殊混和材 γ-C_2S を利用することによる CO_2 の削減量（▲197kg/m³）と、炭酸化養生による CO_2 の吸収量（▲109kg/m³）の合計は▲306kg/m³ となる。このように、CO_2-SUICOM は一般製品と比べて大幅な CO_2 削減を達成するとともに、その CO_2 排出量は-18kg/m³ とカーボンネガティブも実現できるコンクリートである。

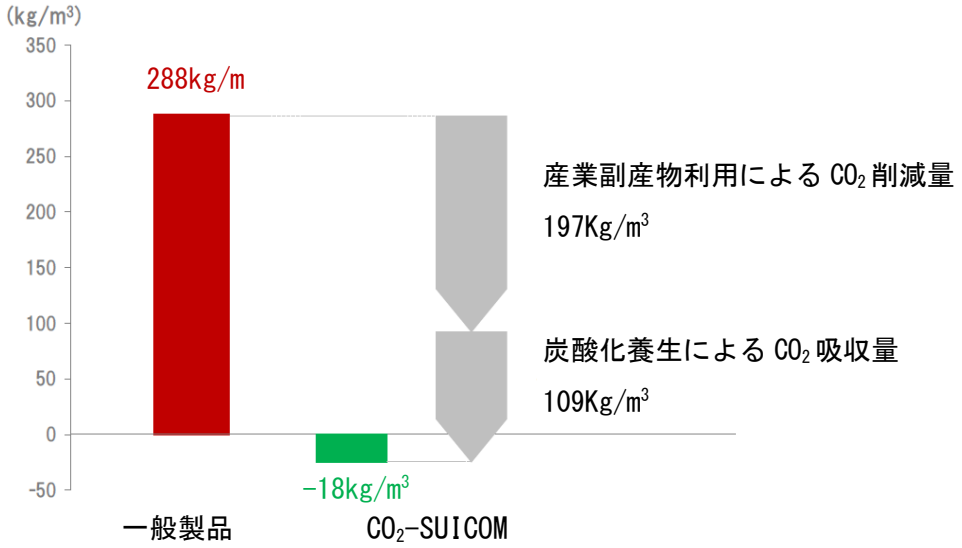


図 1.3　歩車道境界ブロックの CO_2 排出量比較例

② CO_2-SUICOM の適用実績

CO_2-SUICOM は 2011 年から実工事で使用するプレキャストコンクリート製品に多数適用されている。

- 歩車道境界ブロック（5 件）
- インターロッキングブロック（3 件）
- 埋設型枠（4 件）
- その他（建築用プレキャストパネル・基礎ブロック護岸ブロック・張りブロック）

図 1.4　CO_2-SUICOM 製歩車道境界ブロック

（３）今後の展望

現状の CO_2-SUICOM は、CO_2 を養生槽で吸収させる製造工程があることなどから、製品の適用範囲が主にプレキャストコンクリート製品に限られている。そのため 2020 年から現場打設コンクリート構造物へ適用可能とするための技術開発に取り組んでおり、2020 年代中頃の商用化を目指している。

CO_2-TriCOM　中国電力㈱　②

（１）技術概要

CO_2-TriCOM（シーオーツートリコム）とは、火力発電所から発生する石炭灰（フライアッシュ：Coal ash）に加え、コンクリート電柱をリサイクルする際に発生する廃コンクリート粉（Concrete waste）をカーボンリサイクルの鉱物化に分類される土木工事用の資材として再生させるリサイクル技術である。フライアッシュに加え、廃コンクリート粉を混合し、火力発電所から発生する CO_2 を加え、マイクロ波による加熱で焼結するとともに、廃コンクリート粉に含まれる酸化カルシウム（CaO）と CO_2 を反応させ、炭酸塩（$CaCO_3$）を生成、CO_2 を固定化する。CO_2-TriCOM の命名については、3 つの CO を取り込んだ材料という意味から Triple CO Capture Material とし、それを略して TriCOM としている。CO_2-TriCOM のイメージを図 2.1 に示す。

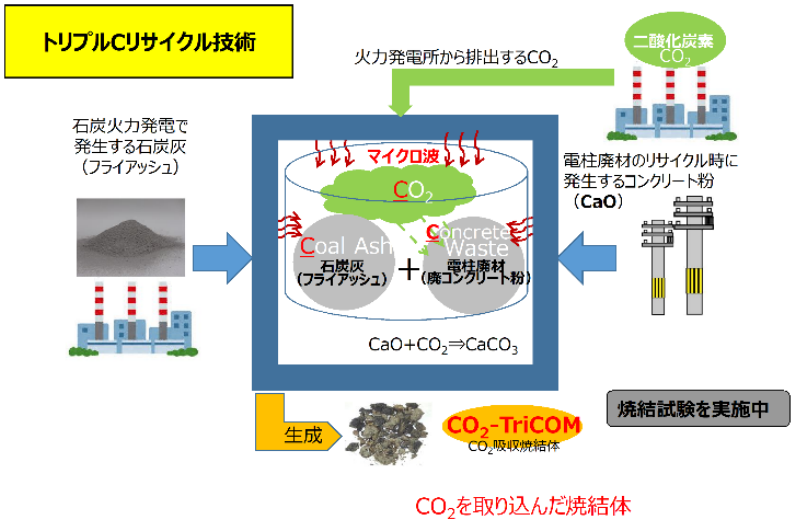


図 2.1　CO_2-TriCOM のイメージ

石炭火力発電所で発生する石炭灰は、フライアッシュとクリンカアッシュに大別される。フライアッシュは主にフライアッシュコンクリート等に使用されるが、クリンカアッシュは緑化基盤材、軽量盛土材、排水材などの幅広い用途がある。本技術により生成された焼結体は、クリンカアッシュに近い物理性状を示すため、軽量盛土材、緑化基盤材等として幅広く利用されることが期待される。

本技術開発について、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が公募した「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO_2 排出削減・有効利用実用化技術開発／コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの CO_2 利用技術開発」に、中国電力株式会社、国立大学法人広島大学及び中国高圧コンクリート工業株式会社の共同で応募し、2020 年 7 月に採択された。また、中国高圧コンクリート工業株式会社の再委託先として学校法人中部大学が参画している。

（２）CO_2 低減率の試算または実績

本技術では、CO_2 吸収量を焼結体 1t 当り 60 kgを目標としている。しかし、マイクロ波を用いて加熱することで、その消費電力により CO_2 が発生する。そのため、その消費電力を半減させるとともに、焼結体 1t 当りの CO_2 吸収量を 60 kgとすることにより、CO_2 収支を 167 kg/t とすることを研究開発の目標としている。CO_2 収支を抑制することにより、他の競合材料よりも CO_2 収支が低くなる見込みである。

（３）今後の展望

商用化時には 5 万 t/年の製造を目標とし、2030 年度の商用化を目指し、さらなる研究を継続する。

参考文献

1) 香川慶太：マイクロ波を用いた日本初の CO_2 リサイクル技術～CO_2-TriCOM, 化学工学, Vol.85, pp342-344
2) 香川慶太、宮本将太他：マイクロ波による CO_2 吸収焼結体の研究開発（CO_2-TriCOM）,令和 4 年度火力原子力発電大会（広島大会）要旨集
3) 香川慶太、宮本将太他：マイクロ波による CO_2 吸収焼結体の研究開発～CO_2-TriCOM～,日本電磁波エネルギー応用学会　JEMEA　Web 機関紙　第 8 巻 pp11-13

DAC コート　清水建設㈱　③

（１）技術概要

DAC（Direct Air Capture）コートは、表層に塗布した含浸剤を介してコンクリート構造物に大気中の CO_2 を吸収・固定化させる技術である（図 3.1）。コンクリートは本来アルカリ性であるため、供用中に大気中の CO_2 を吸収していく。DAC コートはその吸収速度を含浸剤塗布前の 1.5 倍以上に増大させることができる。

コンクリートが CO_2 を吸収する現象は、元来、中性化と呼ばれ、内部鉄筋の腐食につながる劣化現象として扱われてきた。これに対し、DAC コートの主材となるアミン化合物は防食性能を有しているため、コンクリートの中性化に起因する鉄筋の腐食を抑制し、コンクリート構造物への CO_2 固定促進と、その長寿命化の双方を同時に実現する。

DAC コート適用の有無による 5 年間の CO_2 固定量をシミュレーションにより比較した結果を図 3.2 に示す。図はコンクリート表面からの深さとコンクリートの組成を示しており、DAC コートを適用することで、コンクリートのより深くまで、より多くの $CaCO_3$ が生成していることがわかる。この $CaCO_3$ は、CO_2 がコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して生じたものであり、CO_2 固定量に相当する。

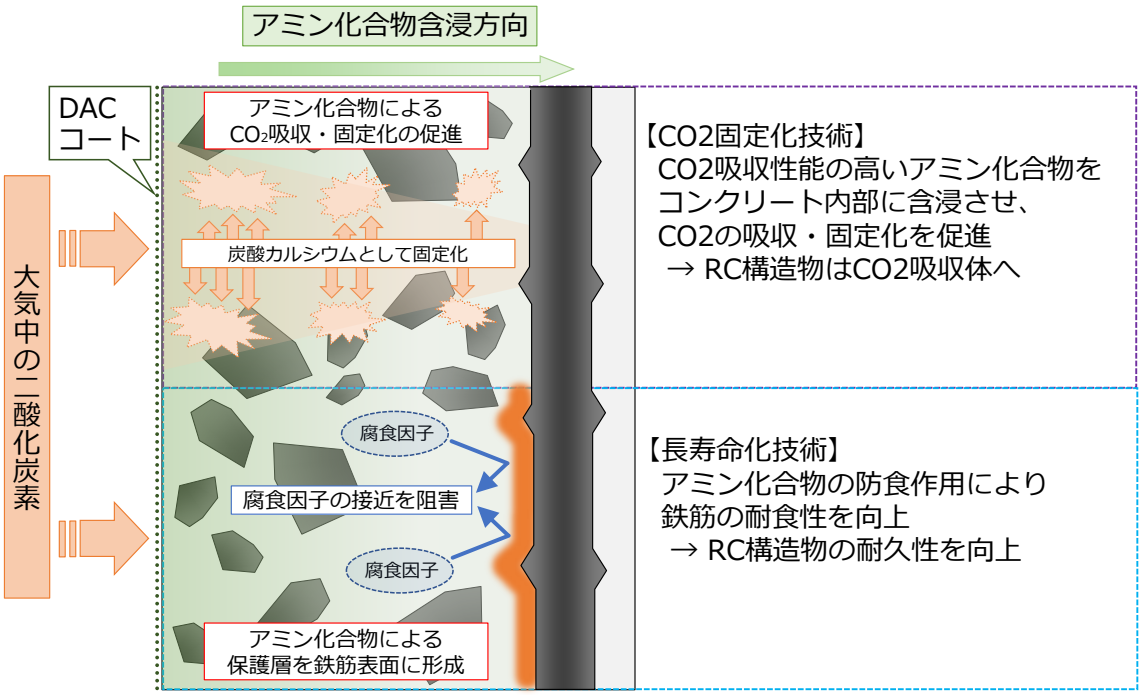


図 3.1　DAC コートの概念図

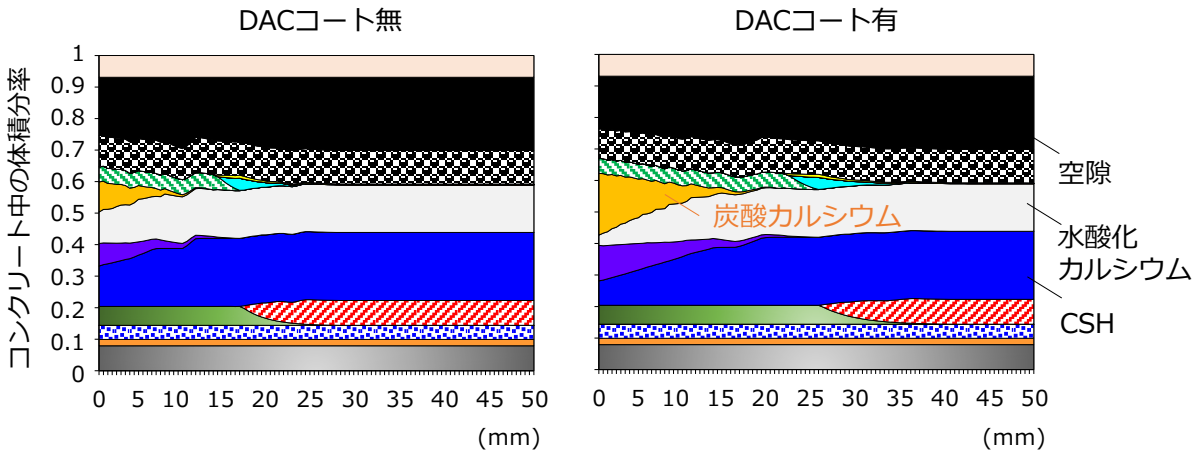


図 3.2　DAC コートの有無による 5 年後の CO_2 固定量の比較（シミュレーション）

（２）新設・既設を問わず広く適用可能

DAC コートの特徴は、新設・既設を問わずに適用できる点にある。日本国内におけるコンクリート構造物のストックは約 100 億 m^3 以上と推計される。コンクリートは通常、1m^3 当たり約 18kg の CO_2 を固定すると言われており、DAC コートを適用することで、その固定量を 27kg～36kg に増大できる。すなわち、既設ストックの露出部全体に本技術を適用した場合の CO_2 吸収ポテンシャルは 3 億トン以上に達する。その他、再生骨材や解体時に発生するコンクリートガラに対しても積極的に CO_2 を固定することが可能である。

（３）今後の展望

コンクリート構造物への CO_2 固定促進と長寿命化を両立した DAC コートにより、コンクリートに CO_2 吸収体（カーボンクレジット）としての新たな価値を付与できる。

今後は、2026 年頃の実用化をターゲットに、産学連携を加速させ、ラボでの性能評価、実大規模での性能実証、施工法の標準化やカーボンクレジット化の検討等を進めていく。

図 3.3　コンクリート構造物への新たな価値創造

強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリート　東京電力 HD(株)　④

（１）技術概要

強制炭酸化再生骨材とは、主には品質区分 M,L を対象とした再生骨材を強制的に炭酸化することによって、付着モルタル部分を緻密化し、密度や吸水率等の品質を改善したものを指す。本技術によって CO_2 固定と品質改善を実現することにより、コスト等の課題によって普及が停滞している再生骨材の利用を促進し、コンクリート分野における高次な資源循環形成を目指す。現在、東京電力 HD(株)では強制炭酸化骨材とこれを用いたコンクリートに関する実証と実装に向けた検討が進められている。

図 4.1　再生骨材

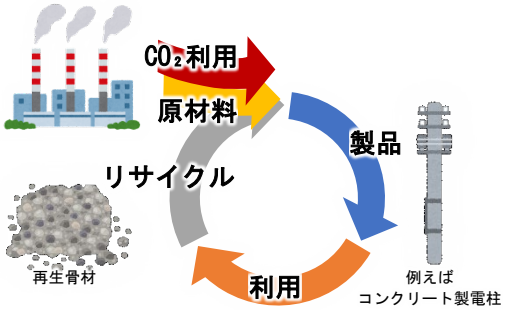


図 4.2　強制炭酸化再生骨材の循環利用サイクル

① 簡易な製造プロセス

強制炭酸化再生骨材の炭酸化養生に使用するガスは、火力発電所を含むボイラー等の排ガス利用（CO_2 濃度 5～15%程度）を主流とし、高濃度ガスの適用を必要としない。そのため，CO_2 の分離回収工程を経ず、加温等の必要もないため、簡易なプロセスで製造が可能である。製造過程で消費するエネルギー（CO_2 排出量）も基本的に天然骨材を上回らない。

強制炭酸化再生骨材を用いたコンクリートの製造プロセスも、基本的に一般のコンクリート製造と変わりない。

② コンクリートに及ぼす影響

通常の（非炭酸化）再生骨材利用と比べて、強制炭酸化骨材を用いたコンクリートは圧縮強度の低下が抑制される等、多くの物性が一般のコンクリートと同等に改善される。したがって通常の利用範囲において、強制炭酸化再生骨材を用いることは単位セメント量の有意な増加を伴わない。なお、乾燥収縮や凍結融解の激しい作用を受ける場合には、通常の再生骨材と同様に、引き続き注意が必要である。

本技術は、骨材のみを炭酸化させる技術であるため、コンクリート全体の中性化による鋼材の腐食を誘引しない。また、国内で先行する CN 技術、例えばセメントレスコンクリートや CO_2 吸収技術等との併用も可能と考えられる。

（２）CO_2 低減率の試算または実績

既往の研究 [1)]において、再生骨材の炭酸化による質量増加は骨材区分により異なり、表 4.1 に示すとおり試料質量に対して 0.7～2.8%変化することが報告されている。この質量変化の全量が CO_2 固定によるものか判断は早計であるが、炭酸カルシウム量の変化もおよそこれに符合していることから、再生骨材の強制炭酸化による CO_2 固定量のオーダーもこれに相応する（同等とした場合、試料 1t あたり 7～28kg-CO_2）と考えられる。なお、強制炭酸化再生骨材は、排ガスを直接利用し、軽度の破砕、分級プロセスのみで製造されるため、製造時の消費エネルギーは天然骨材の製造時消費エネルギーを上回らず、炭酸化により固定化された CO_2 量がそのまま CO_2 低減に寄与するものと考えられる。

国内の廃コンクリート発生量は 37 百万 t/年であり、全量を潜在市場と考えた場合、約 1 百万 t-CO_2/年のポテンシャルを有することになる。

表 4.1　強制炭酸化による再生骨材の質量変化量(%)

	再生粗骨材 M	再生粗骨材 L	再生細骨材 L	電柱破砕材
実測最大	0.4	1.5	2.8	0.7

（３）今後の展望

コンクリート分野においても、持続可能社会の実現に向けて循環資源利用の機運はより高まっていくものと考えられる。したがって、再生骨材利用も浸透していくことが期待される。このような背景において、品質が改善され、かつ CO_2 固定の付加価値を擁する強制炭酸化再生骨材の普及は大いに期待される。

一般のコンクリートへの利用は、規格等の制約によって直ちに普及するに至らないことが予想されるため、導入期においては用途、製品を特定した利用によって実積を蓄積していく必要がある。普及にあたっての製造拠点は、火力発電所のみならず、簡易な製造プロセスである利点も活かして市中の工場等への適用も念頭に参画企業を拡大していきたいと考えている。

参考文献

1) 松浦忠孝，小林保之，青山裕之，尾崎公則：強制炭酸化した再生骨材および電柱破砕材の品質に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45, No.1, pp. 1246-1251 (2023).

カーボンキュア（CarbonCure）三菱商事㈱ ⑤

（１）技術概要

この技術は、コンクリートの練り混ぜ時に適切な量の液化二酸化炭素をミキサー内に噴霧することにより、セメントに含まれるカルシウム分と二酸化炭素の反応によりナノレベルの炭酸カルシウムが生成される鉱物化反応の原理を活用している。

この鉱物化によるコンクリートの圧縮強度、曲げ強度への影響は略無く、また pH への影響もないため、鉄筋への使用が可能である。また、鉱物化によりコンクリートの強度が発現するため、配合の最適化をすることで、セメント使用量の削減が可能である。

① 本技術のメリット

- 脱炭素：製造時に大量の二酸化炭素を排出するセメントの使用量削減と同時に、鉱物化による二酸化炭素の固定化により、コンクリート製造におけるカーボンフットプリントの低減が可能となる。また、セメント使用量削減はコスト削減にも寄与する。
- 製品スペック：強度や信頼性は従来のコンクリートと変わらない。
- 製品コスト：液化二酸化炭素タンク、制御装置等、簡易な設備を設置するだけで導入可能なため、これらの導入コストの価格転嫁を抑えられる。

② カーボンキュア社について

2007 年にカナダで設立されたベンチャー企業。ビル・ゲイツ氏が率いるファンド、マイクロソフト、アマゾン等が株主に名を連ねている。現時点で世界 30 か国以上において 800 を超える工場で導入済み。日本に於いては、三菱商事が事業展開を推進し、會澤高圧コンクリート株式会社や河島コンクリート工業株式会社を含む数工場での導入実績が有る。

（導入設備イメージ）

液化二酸化炭素タンク

（２）CO_2 削減量および適用実績

① カーボンキュアによるコンクリートの CO_2 削減量

カーボンキュア社によると平均でコンクリート 1 平米当たり 17 キログラムの CO_2 削減が見込める。尚、これはセメント削減に起因するもの、及び鉱物化による二酸化炭素の固定化によるもの両方を併せたものである。これは一般的な高層ビル一棟に使用する全てのコンクリートに適用すると 680 トンの CO_2 削減に相当し、これは 360 ヘクタールの森林が 1 年間に吸収する CO_2 に相当する。

②カーボンキュアの適用実績

北米では Amazon 本社ビル、LinkedIn 本社ビル、カナダのカルガリー空港、シカゴのマクドナルド旗艦店、ハワイの高速道路インターチェンジ等の多数の適用実績が有る。

日本国内では會澤高圧コンクリート株式会社において小規模建築用杭状地盤補強工法に使用する H 型パイル等での出荷実績が有る。

Amazon HQ2
Arlington, VA
Miller & Long
CO_2 Saved: 1,261 TONS / 1,144 TONNES

LinkedIn Middlefield Campus
Mountain View, CA
Central Concrete Supply Co.
CO_2 Saved: 2,400 TONS / 2,177 TONNES

McDonald's Chicago Flagship
Chicago, IL
Ozinga Ready Mix
CO_2 Saved: 30,000 LBS / 13,608 KG

Kapolei Interchange Phase II
Honolulu, HI
Island Ready-Mix
CO_2 Saved: 1,500 LBS / 680 KG

（３）今後の展望

2050 年迄のカーボンニュートラル達成に向けた CO_2 排出量の削減ニーズが社会的に高まっている中、カーボンキュアは既に商業化されて広く導入されている数少ない技術である。また、コンクリートの強度に影響を与えない点、セメント使用量の削減によるコスト削減が期待できる点、更に導入のハードル（期間・費用）が低いことから、引き続き、日本を含む全世界で導入が広がるものと予想される。

T-Carbon Mixing：大成建設㈱ ⑥

（１）技術概要

本技術は、練混ぜ時に CO_2 を直接噴霧することにより、CO_2 をコンクリートに固定する技術である。

- **コンクリートを 2 段階で練混ぜ**

粗骨材を除くコンクリート材料の 10～30%を先行して練り混ぜる（1 次練り）。この際、ミキサ内に設置されたノズルより CO_2 を直接噴霧し、練混ぜ材料に CO_2 を確実に固定する。その後、残りの材料と併せて練り混ぜを行い、コンクリートを製造する（2 次練り）。

2 段階に分けてコンクリートの練混ぜを行うことで、効率的な CO_2 固定化を実現するとともに、過度の CO_2 固定を防止することが可能。

- **CO_2 を固定したコンクリートの材料特性**

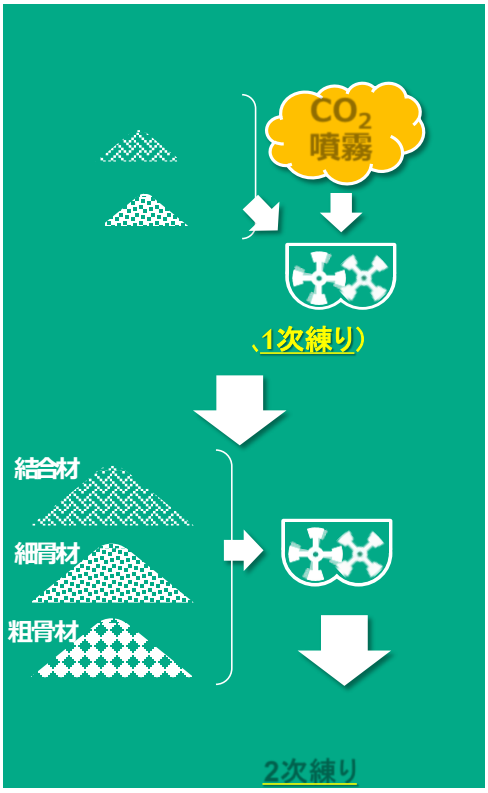
内部のアルカリ性を保持するとともに、強度も通常のコンクリートと同等。

- **既存の設備への適用**

既存のコンクリート製造プラントに CO_2 噴霧用のボンベやノズルを設置することで、本技術の適用が可能。

- **環境配慮コンクリート 「T-*e*Concrete®」と併用が可能**

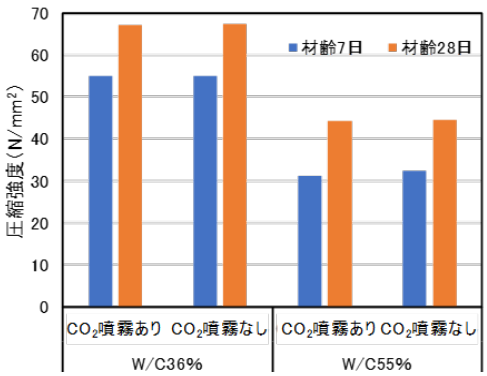
普通コンクリートへの適用性は勿論のこと、当社開発の T-*e*Concrete®」※に適用することで、CO_2 排出量の大幅な削減が可能。



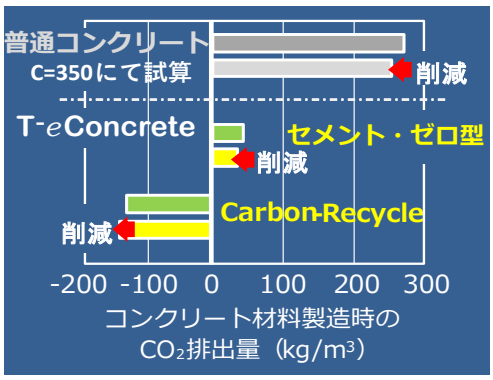
T-Carbon Mixing における
コンクリートの製造手順 [1)]

※「T-*e*Concrete®」

コンクリート材料製造時の CO_2 排出量を大幅に削減でき、一般的なコンクリートと同様の製造・施工方法で同等の性能を有し、高炉スラグ微粉末の大量使用により資源の有効活用に貢献するコンクリート



CO_2 噴霧の有無がコンクリート圧縮強度
に及ぼす影響の検証結果 [1)]



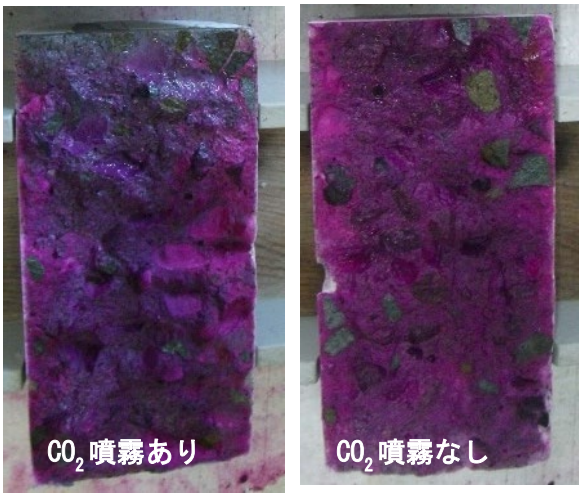
T-Carbon Mixing 適用による
CO_2 排出量削減効果

（２）CO_2 低減率の試算または実績

- 水セメント比 36～55%の普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートを対象とした室内試験結果より、本技術による CO_2 固定量は概ね 10kg/m^3 である [1)]。
- 本技術の適用による圧縮強度への影響は、全く無い [1)]。
- 本技術を適用したコンクリートは、内部のアルカリ性を保持しているため [1)]、鉄筋コンクリート構造物への適用も可能である。

普通コンクリートにおける
CO_2 固定量測定結果 [1)]

実験ケース	CO_2 固定量
水セメント比 36%	10. 2 kg/m^3
水セメント比 45%	9. 30 kg/m^3
水セメント比 55%	8. 20 kg/m^3



2 次練り後におけるフェノールフタレイン
噴霧状況（アルカリ性保持）[1)]

（３）今後の展望

本技術は、既存のコンクリート製造プラントに CO_2 噴霧用のボンベやノズルなどを設置することで適用可能であり、対象とするコンクリートの制限もないため、現場打ち用コンクリート、ならびに二次製品用コンクリートなど幅広く適用を進めていく予定である。

参考文献

1) 松元淳一ほか：コンクリート製造時に二酸化炭素を固定させる技術，コンクリート工学，Vol.61, No.2, pp.138-144, 2023.2

O.C.O Technology Limited ㈱神鋼環境ソリューション 三菱商事㈱ ⑦

（１）技術概要

本技術は、焼却飛灰等に含まれるカルシウムなどを水・CO_2と反応させ、世界初のネガティブエミッション骨材を製造する技術である。基本的な反応を図 6.1 に示す。英国の O.C.O Technology 社が開発した Accelerated Carbonation Technology (ACT:高速炭酸塩化技術)を用いることにより、通常数か月から年単位で進行する炭酸塩化が数分で達成される。本技術で製造される骨材は以下の 3 点の特徴がある。

① **CO_2 の削減**：高速炭酸塩化技術により、化学的に安定な状態である炭酸カルシウムの形で CO_2 を固定することが可能。また、炭酸塩化は発熱反応であり加温や加圧が不要であるため、製造プロセスにほとんどエネルギーを消費しないことが特長である。さらに、排ガス中に含まれる CO_2 を直接利用することも可能であり、原料 CO_2 を回収・調達する際のエネルギ―消費や費用も削減できる。

② **廃棄物中の金属溶出抑制**：廃棄物中の重金属は炭酸塩化することで、様々な化学的・物理的メカニズム (例：化学形態の変化、固溶体への取り込み等) により安定な状態へ変化する。その結果、重金属の溶出を抑制する効果がある。原料は、木質バイオマス灰、都市ごみ飛灰、セメントダスト、製鋼スラグ、製紙焼却灰等、多岐に渡る廃棄物を用いることが可能である。

③ **廃棄物の有効利用**：通常処理費用が発生する産業廃棄物、および排出量の削減が喫緊の課題とされる CO_2 を原料に骨材を製造できる。製造される骨材は M-LS（Manufactured Limestone）と呼ばれ、代表的な密度は 1、100±100kg/m^3、圧縮強度は> 5N/mm^2 である。コンクリートやモルタルの軽量骨材、あるいは、建築用レンガや土木用ブロック、路盤材等の骨材として利用できる。また、セメントや砂と混合・造粒前の粉体の状態においても、混和剤等としての使用を検討している。図 6.2 に炭酸塩化後の粉体、炭酸塩化・造粒後の骨材を示す。

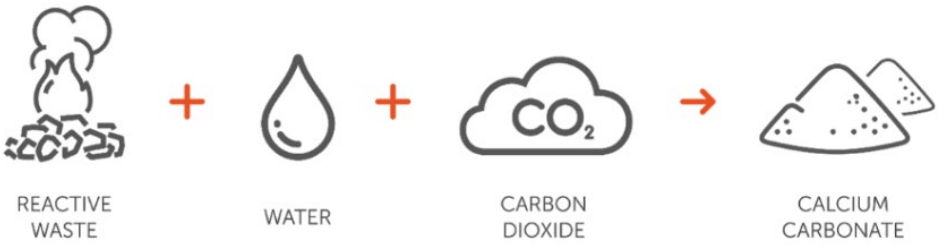


図 6.1　基本的な高速炭酸塩化反応

図 6.2　左：炭酸塩化後の粉体、右：炭酸塩化・造粒後の骨材

（２）CO_2 低減率の試算または実績

① CO_2 削減量

O.C.O Technology 社によると、製造される骨材への CO_2 固定量（原料 CO_2 量＋造粒後の吸収 CO_2 量）は製造時に排出される CO_2 量より多く、骨材 1 トン当たり 49kg の CO_2 排出量を削減できると評価されている。これは Environmental Product Declaration (EPD: 環境製品宣言)に記載されている値であり、独立した第三者機関により ISO 14025 に基づき検証されている。また、Cradle to Gate (原料から製品化するまで) の計算であり、原材料の製造、工場への原材料の輸送、骨材の製造、の各プロセスでの CO_2 排出量を加味した CO_2 削減量である。本削減量は、1,000t の骨材を製造するごとに、4,000 本の木を植えるのと同量の CO_2 を削減する規模である。

② 実績

O.C.O Technology 社の所在地である英国内では既に 3 つの工場(Brandon、Bristol、Leeds)が稼働しており、特に南東部 Brandon の工場は 2012 年に稼働を開始し、10 年以上の操業実績がある。これらの工場全体で年間 20 万 t 以上の廃棄物が処理され、その結果年間 45 万 t 以上の骨材が製造されている。

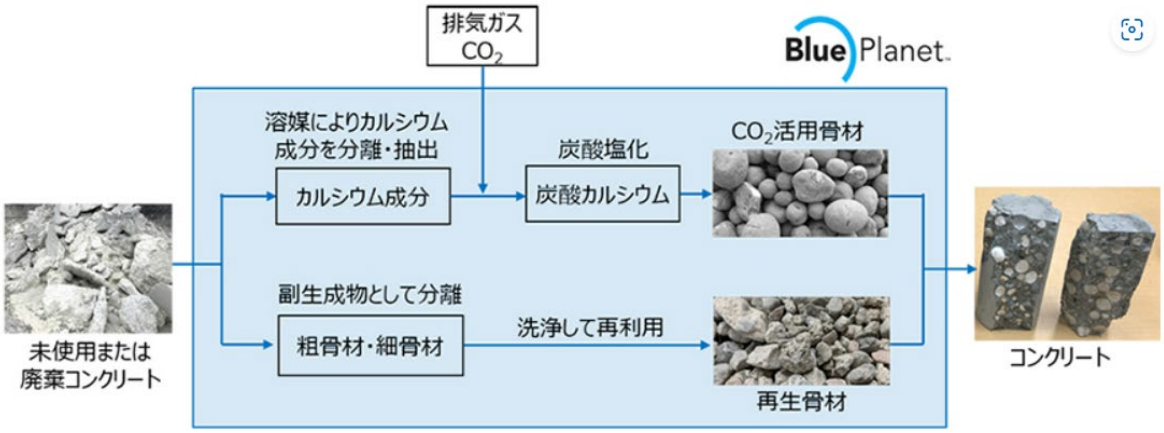
（３）今後の展望

英国内のみならずグローバルで事業規模を拡大させており、スペイン（Repsol・Petronar 社と協業）とオーストラリアで商業プラントの建設を進めている。また、日本においても事業展開を検討している。世界の廃棄物ベースで試算すると 240Mt の CO_2 削減ポテンシャルがあり、事業規模の拡大により低炭素社会実現への貢献が期待される。

Blue Planet　三菱商事㈱　⑧

（１） 技術概要

Blue Planet は 2012 年の創業以来、環境負荷低減を目標に CO_2 有効活用技術の開発とその事業化に取り組んでいる。当技術の製造プロセスは、発電所などの排気ガスに含まれる CO_2 をコンクリートへ固定化する技術と、未使用コンクリート又は廃棄コンクリートなどの廃棄物を有効活用する技術が用いられている。具体的には、未使用または廃棄コンクリートから、特殊な溶媒を用いてカルシウム成分と再生骨材とを分離・抽出し、カルシウム分と排気ガスに含まれる CO_2 とを反応させる事で炭酸カルシウムを生成・造粒する事でカーボンネガティブ骨材を製造するという技術（下図）である。



（２） CO_2 低減率の試算または実績

コンクリート 1m³ を製造する際、約 300kg の CO_2 が発生するが、一般的なコンクリートに含まれる粗骨材・細骨材の全てを Blue Planet の技術で製造された骨材で置き換えた場合、約 600～700kg の CO_2 を固定する事が出来る。この場合、コンクリート製造時に排出する CO_2 の総和は約▲300kg（カーボンネガティブ）となる。

また、同社の CO_2 活用骨材は、既に米国サンフランシスコ国際空港の改装工事で使用された実績もある。

（３） 今後の展望

現在、2021 年から米国カリフォルニア州シリコンバレー地区で、上述の試算値の検証ならびにスケールアップを目指した実証事業を行っている。尚、他にも投資家として世界最大手セメント企業のスイス Holcim、エンジニアリング会社のスイス Sulzer、オイルメジャーの米国 Chevron 等も参画している。日本での商業展開に関しては、Blue Planet と三菱商事は、本格的に商業展開する計画を立てている。

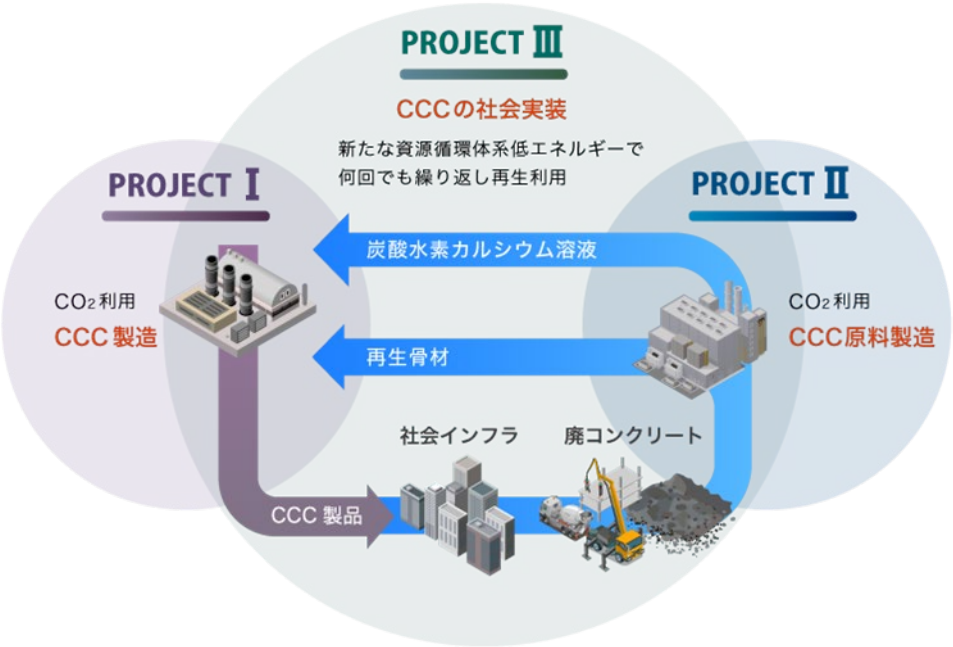
CCC（C⁴S プロジェクト） 東京大学・北海道大学 ⑨

（１）技術概要

C⁴S では、コンクリート構造物中のカルシウム（Ca）を CO_2 吸収源とみなし、構造物の解体によって発生するコンクリート廃棄物中の Ca と大気中の CO_2（工場排ガス中の高濃度 CO_2 でも可）とを結合させて、炭酸カルシウムコンクリート（CCC：Calcium Carbonate Concrete）として再生する技術を開発し、CCC を従来のセメント・コンクリートに替わる主要な建設材料として実用化することで、コンクリートのクローズドループの資源循環を実現することを目標としている。

2022 年 2 月公開情報時点での CCC の製造手法としては、まず、コンクリート廃棄物を破砕して再生骨材と微粉末（主成分：セメント硬化体）とに分別し、どちらも完全に炭酸化（化学反応式：$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$）させる。次に、炭酸化させた微粉末を水中に投入した後に、水中に CO_2 を吹き込んで炭酸水素カルシウム（$Ca(HCO_3)_2$）水溶液とする（化学反応式：$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$）。そして、容器に詰めた再生骨材粒子間に炭酸水素カルシウム水溶液を通水し、水分蒸発、温度変化、pH 変化など、炭酸カルシウムの溶解度を低下させる操作を施すことで、再生骨材粒子間に炭酸カルシウムの微細な結晶を析出させる。これにより、再生骨材がつなぎ合わされて硬化体となる。

2022 年 2 月公開情報時点での圧縮強度は、直径 10mm の円柱体で 15MPa、直径 50mm の円柱体で 4MPa であり、2022 年末までには建築基準法で求められる 12MPa を直径 100mm の円柱体で実現すべく、現在、製造プロセスの改善が試みられ、従来のコンクリートを CCC に置換することによる大幅な CO_2 削減量が期待されている。



（ムーンショット C⁴S Website より転載：https://moonshot-c4s.jp/）

（２）CO_2 低減率の試算または実績

2023 年 10 月時点で、LCA-CO_2 が製造プロセスの精査が終わっておらず、未公表である。

（３）今後の展望

2023 年 10 月時点で、強度増進・大型部材の製造方法の確立に向けて技術開発中である。

T-*e*Concrete シリーズ：大成建設（株）　⑩⑮㉔㉖

（１）技術概要

コンクリートの材料製造に関わる CO_2 排出量のうち、90%以上がポルトランドセメントの製造時に排出される。「T-*e*Concrete」はセメントの一部またはすべてを産業副産物やカーボンリサイクル製品に置き換えて、CO_2 の排出削減や CO_2 収支のマイナスを実現する。以下には、特に脱炭素社会への貢献が期待される T-*e*Concrete/Carbon-Recycle について特徴をまとめた。

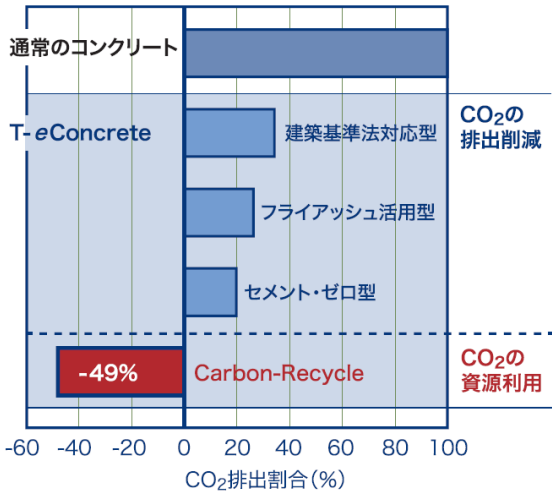
環境配慮コンクリート「T-eConcrete®」シリーズ

●建築基準法対応型
セメントの代わりに高炉スラグ（製鋼過程で生じる産業副産物）を使用します。建築物の建設に適しています。

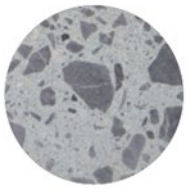
●フライアッシュ活用型
セメントの代わりに高炉スラグとフライアッシュ（石炭灰の一種）を使用します。発電所など容易に石炭灰を入手できる場所での使用に適しています。

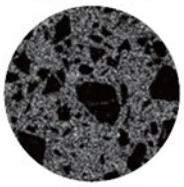
●セメント・ゼロ型
セメントを使用せず、高炉スラグを特殊な反応剤を用いて固めます。CO_2排出削減を極めたコンクリートです。

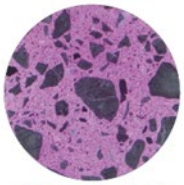
●Carbon-Recycle
セメント・ゼロ型に炭酸カルシウムなどカーボンリサイクル製品を加えて製造したコンクリートです。
CO_2収支マイナスを実現します。2030年のリサイクルシステムの確立を目指しています。



技術の特徴


切断面
（直径10cm）


固定した炭素の分布
（白い点）

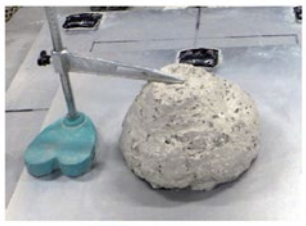

pH指示薬の呈色
（ピンク＝強アルカリ性）

●CO_2 収支マイナスを実現
CO_2排出量が少ない産業副産物（高炉スラグ）を使用し、大量のCO_2を炭酸カルシウムとして固定します。

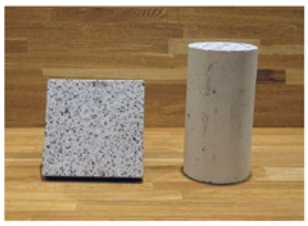
CO_2排出量（収支）	−116 ～ −45 kg/m³
炭酸カルシウムのCO_2固定量	98 ～ 171 kg/m³

●鉄筋腐食を防ぎ、構造物の耐久性を維持
・CO_2をそのまま吸収せず、炭酸カルシウムとして固定するためコンクリートは強アルカリ性です。
・鉄筋の腐食を防いで耐久性を維持し、従来どおりの構造物の建設が可能です。

●通常設備で製造でき、従来のコンクリートと同等の強度、施工性を発揮
・生コン工場の通常の設備で製造できます。
・建設現場にCO_2を持ち込まないため、安全です。
・スランプ：12 ～ 21cm、スランプフロー：45 ～ 60cm、圧縮強度：20 ～ 45N/mm²


スランプ15cm

スランプフロー60cm


圧縮強度20～45N/mm²

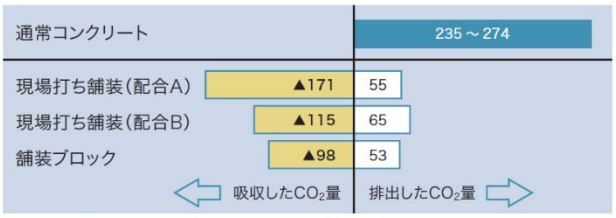
（２）CO_2 低減率の試算または実績

＊T-*e*Concrete/Carbon-Recycle の事例と CO_2 低減率

○大成建設 技術センター 人と空間のラボ前現場打ち舗装および舗装ブロック

T-*e*Concrete ／Carbon-Recycleを現場打ち舗装と、舗装ブロック敷設に使用することで、1.5ｔ以上のCO_2排出量を削減しました。

施工日　：2021年12月
施工面積：
　現場打ち舗装
　　・配合A(圧縮強度：25.5N/mm²)：3.84m²
　　・配合B(圧縮強度：43.8N/mm²)：3.84m²
　舗装ブロック　　：69.5m²



コンクリート製造時のCO_2排出量の収支　単位(kg/m³)

大成建設 技術センター 人と空間のラボ前

現場打ち舗装施工状況

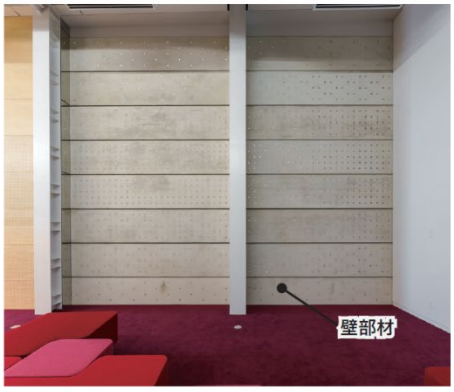
舗装ブロック施工状況

○大成建設 技術センター 音響のラボ　壁部材

T-*e*Concrete ／ Carbon-Recycleを壁部材に使用することで、CO_2排出量を約1.1ｔ以上削減できました。

施工日　　：2021年11月
施工面積　：28.8m²
製品仕様　：
　・形状　　：3m×0.6m×0.12m　・数量　　：12枚
　・圧縮強度：40N/mm²　　・補強材　：鉄筋・鋼繊維

コンクリート製造時のCO_2排出量の収支　単位(kg/m³)



大成建設 技術センター音響のラボ

＊T-*e*Concrete/セメント・ゼロ型の事例と CO_2 低減率

○下水処理場シールドトンネル工事

セメントを使わないセメント・ゼロ型をシールドトンネルへ国内初適用しました。これにより、従来のセグメントと使用時と比較して約7割を超えるCO_2を削減しました。

○千葉印西エリア洞道新設工事(その2)

シールドトンネル工法で施工される地中送電洞道のインバート部の部材にセメント・ゼロ型を大量に適用しました。
これにより従来のコンクリートに比べ材料製造時のCO_2排出量を8割程度削減でき、「T-*e*Concrete」の使用量(223m³)から算出されるCO_2削減量は、インバートおよび歩床部材全体で53.8ｔになります。

（３）今後の展望

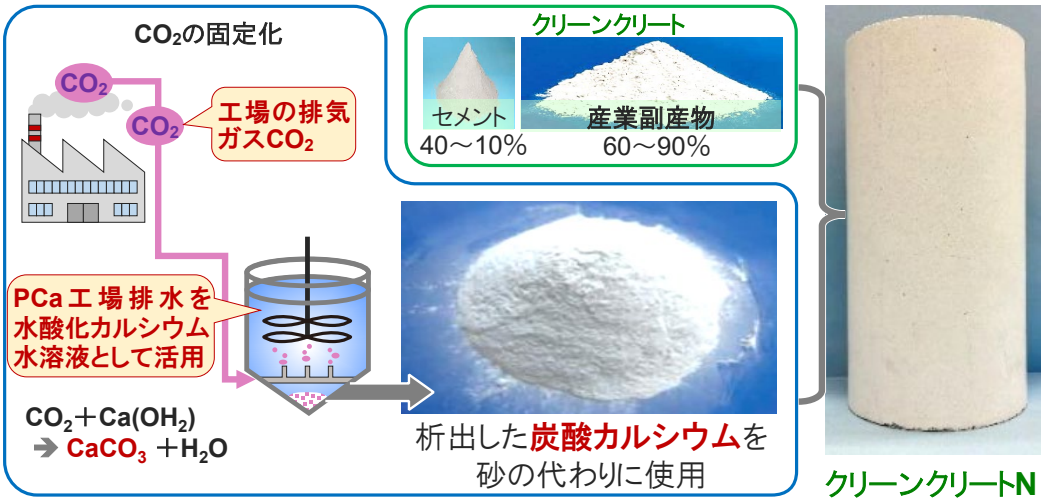
4 種類のコンクリートとも既存の装置や設備で製造施工でき、現場打ちにより RC 構造物への適用も可能であり、従来のコンクリートと容易に置き換えることができる。また、適用実績も順調に増えている。今後も、現場打ちコンクリート、二次製品として積極的に社会実装を進める。

クリーンクリートN　㈱大林組　⑪

（１）技術概要

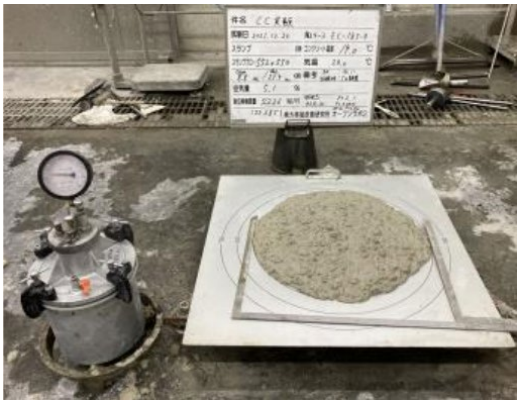
「クリーンクリートN」は、「クリーンクリート※」に CCU 粉体（Carbon dioxide Capture and Utilization：CO_2 を回収・利用した粉体）を混ぜ合わせることで、CO_2 の排出量を差し引きゼロ（カーボンニュートラル）から、さらにマイナス（カーボンネガティブ）まで達成できるコンクリートである。この CCU 粉体は、コンクリート遠心成形品の製造工場において排出されるスラッジ水に、同工場における蒸気養生の際に発生する排気ガスを吹き込んで生成させた炭酸カルシウムを主成分としている。CO_2 固定量は 390kg-CO_2/t であり、CO_2 の排出量の削減と同時に廃棄物の削減も実現可能となる。

※セメントを高炉スラグ微粉末･フライアッシュ･シリカフュームなどの産業副産物（混和材）に大量に置換し、70～80%程度の CO_2 排出量を削減できる低炭素型のコンクリート

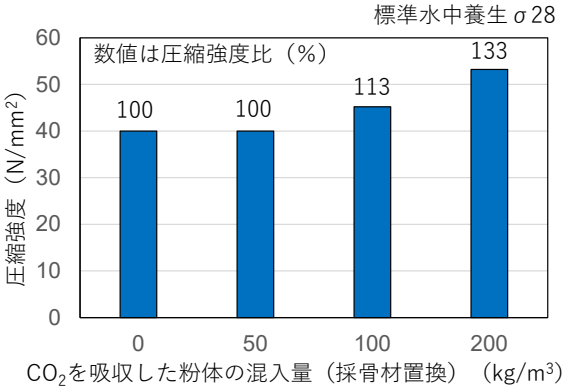


クリーンクリート N 概要

粉体（セメント･高炉スラグ微粉末･CCU 粉体）の量が多いため、高流動コンクリートが基本となり、締固め不要のため施工の省力化も可能である。圧縮強度は CCU 粉体の混入量増加に伴い、大きくなることが確認されている。



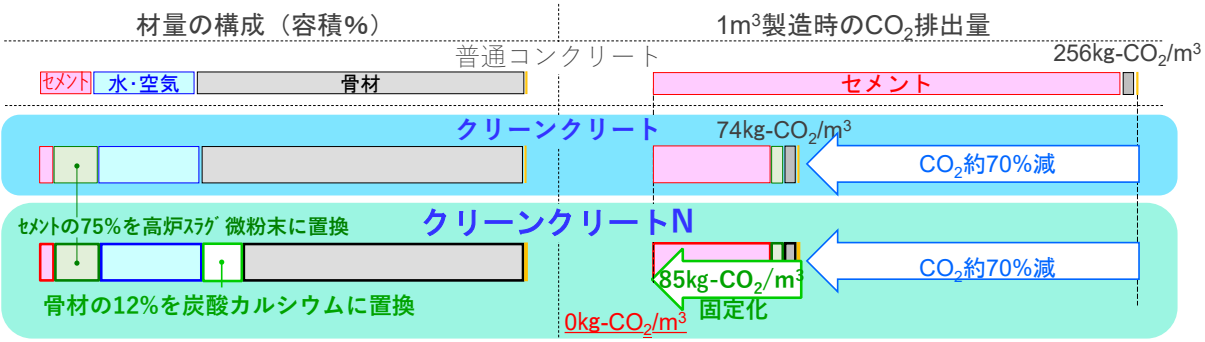
クリーンクリート N フレッシュ性状



CCU 粉体混入量と圧縮強度の関係

（２）CO_2 低減率の試算または実績

「クリーンクリート」の標準配合では、CO_2 排出量が 760～770 kg-CO_2/t 程度であるポルトランドセメントの 75%を高炉スラグ微粉末（24～36 kg-CO_2/t）に置換することで、CO_2 を約 70%削減することが可能だが、「クリーンクリートＮ」では更に細骨材を CCU 粉体に置換する。混入量は任意だが、一例として 200～250kg/m³ CCU 粉体を混入することで、CO_2 排出量と CO_2 固定化量が釣り合った、カーボンニュートラルが達成できる。また、更に CCU 粉体の置換率を増やすことで、カーボンネガティブを達成できる。2023 年 3 月には現場打ちの RC 擁壁に適用し、一般のコンクリートに比べて CO_2 排出量を 106%削減した。



クリーンクリートＮの CO_2 削減量

（３）今後の展望

2023 年度中に新築物件の外壁プレキャスト部材の製造を開始する。CCU 粉体は規格がまだ整備されていないため、建築基準法上の主要構造部へ適用するのは難しいが（JIS 外にもなる）、今後の適用拡大や規格の整備に備え実験を通じて品質を検証中である。

クリーンクリート N を用いた PCa 外壁部材適用予定 当社実験施設

顧客からの注目度･ニーズは非常に高い状況ではあるが、カーボンニュートラルの達成のために必要な CCU 粉体の製造拠点と供給量が現状では多くないため、今後製造･調達面で各産業との連携が不可欠となる。また、CCU 粉体が各所で製造されるようになった場合、その共通の規格が必要となる。

バイオ炭コンクリート　清水建設㈱　⑫

（１）技術概要

バイオ炭コンクリートは、木質バイオマスを炭化した「バイオ炭」をコンクリートに混和することで、コンクリート構造物に炭素を貯留する環境配慮型コンクリートである。本技術は、成長過程で大気中の CO_2 を吸収した木材の炭化物を利用し、コンクリート内部に CO_2 を固定するもので、製造時に多量の CO_2 を排出するセメントの一部を高炉スラグで代替した低炭素セメントを併用することで、CO_2 の固定量が排出量を上回るカーボンネガティブを実現できる。

バイオ炭は、バイオマス原料を不完全燃焼させて炭化したもので、木材から生成したバイオ炭には、木が光合成で吸収した CO_2 が炭素として固定されている。農業分野では、「バイオ炭の農地施用」が国の J-クレジット制度の対象として認められ、バイオ炭による CO_2 貯留量が環境価値としてクレジット化されている。

一般的な土木配合（設計基準強度 24N/mm²）に対して、フレッシュ性状、硬化性状、耐久性に関する基礎データを取得し、生コン工場での実機試験練りおよびポンプ圧送試験を実施しており、図 11.1、図 11.2 に示すように普通コンクリートと施工性や品質が同等であることを確認している。

バイオ炭コンクリートの特徴は、コンクリート二次製品への適用のみならず、生コン工場で製造し現場打ち施工が可能であるため汎用性が非常に高いこと、1kg あたりの CO_2 固定量が炭酸カルシウムの 4 倍以上であるために CO_2 を効率的に固定化することが可能であること、高炉セメント B 種あるいは C 種などの低炭素セメントと組み合わせることでカーボンニュートラル、カーボンネガティブを実現できること、などが挙げられる。

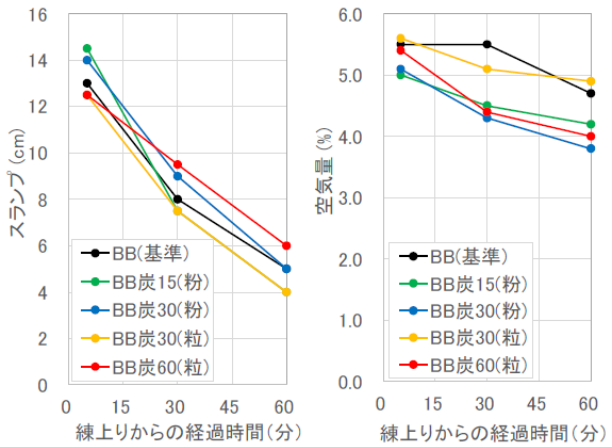


図 11.1　スランプ、空気量

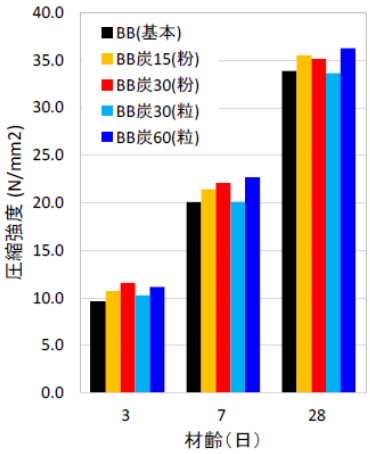


図 11.2　圧縮強度

（２）CO_2 低減率の試算または実績

バイオ炭の材料には、針葉樹や広葉樹の製材時に廃棄されるオガ粉を利用している。オガ粉を炭化したオガ炭は、他のバイオ炭と比べて炭素を安定的かつ多量に固定できる特徴があり、炭素含有率は約 9 割であり、J-クレジットにおける農地施用の方法論では 100 年後の炭素残存

率は約 9 割とされている。バイオ炭 1kg あたりの CO_2 固定量は 2.3kg で、コンクリート 1m³ あたり 60kg のバイオ炭を混和することで、137kg の CO_2 を固定することができる。表 11.1 に示すように、配合 24-12-20N に対して、高炉セメント B 種にバイオ炭を 60kg/m³ 用いる場合、あるいは高炉セメント C 種にバイオ炭を 40kg/m³ 用いる場合にカーボンニュートラルが実現可能であり、さらに、高炉セメント B 種にバイオ炭を 80kg/m³ 用いる場合、あるいは高炉セメント C 種にバイオ炭を 60kg/m³ 用いる場合にカーボンネガティブが実現可能である。

2022 年 10 月に実工事の初適用として、バイオ炭コンクリートを現場内の工事用道路の仮舗装コンクリートに 34.5m³ 使用した。今回の適用においては、高炉セメント B 種にバイオ炭を 60kg/m³ 用いる配合とした。普通コンクリートに対する CO_2 排出量削減率は 99%であり、バイオ炭コンクリートによる CO_2 排出削減量は 6.7 トンである。

表 11.1　バイオ炭コンクリートの CO_2 排出量削減効果の算出例

種類	セメントの種類	バイオ炭混入量	低炭素セメントによる削減量*1 A	バイオ炭による固定量 B	1m3あたりの削減量 A+B	1m3あたりの削減率*2
N-粉20	普通ポルトランドセメント	20kg/m3	0kg/m3	46kg/m3	46kg/m3	19%減
BB-粉20	高炉セメント B種	20kg/m3	97kg/m3	46kg/m3	143kg/m3	60%減
BB-粒60		60kg/m3		137kg/m3	234kg/m3	99%減
BB-粒80		80kg/m3		183kg/m3	280kg/m3	118%減
BC-粒40	高炉セメント C種	40kg/m3	143kg/m3	91kg/m3	234kg/m3	99%減
BC-粒60		60kg/m3		137kg/m3	280kg/m3	118%減

＊1：普通ポルトランドセメントを用いた配合（24-12-20N）に対して
＊2： 配合24-12-20N のCO2排出量（238kg/m3）に対して

（３）今後の展望

バイオ炭コンクリートは、汎用性が高く、CO_2 固定量も定量的に把握することができるため、今後、環境配慮型コンクリートとして、土木分野のみならず建築分野においても普及展開していきたい。建築分野では、JIS 製品ではないバイオ炭コンクリートを構造部材に用いる場合には大臣認定が必要であるが、非構造部材であれば適用しやすいため、まずは非構造物材へと展開していくことを検討している。さらには、バイオ炭をコンクリート以外にも、地盤改良材や緑化基盤などの建設資材にも幅広く適用することで、建設時のおける CO_2 排出量の低減に貢献していければと考えている。

リグニンクリート　㈱大林組　⑬

（１）技術概要

木材は成長する過程で、光合成により吸収した CO_2 を蓄積している。木材利用は「使う・植える・育てる」というサーキュラーエコノミー（循環型経済）の観点からも注目されている。木材の利用による CO_2 の固定が、地球温暖化対策にも繋がるため、積極的な利用が期待されている。

「リグニンクリート」は、木材を原料とする製紙工程で排出される木質バイオマス（再生可能な生物由来の有機性資源で化石燃料を除いたもの）の一種であるリグニンに着目し、腐朽や燃焼利用すると大気に放出される CO_2 を、コンクリート中に長期間、多量に固定することができる。リグニンは、1kg 当たり約 2.4kg の CO_2[※1] を吸収しているため、コンクリート 1m^3 に対して 100kg 添加した場合、CO_2 を 240kg 程度固定できる。産業副産物を併用するなどの配合の工夫で、生コンクリートの製造時に排出する CO_2 と同量の CO_2 をコンクリート中に長期間固定でき、このコンクリートの使用で、環境循環や脱炭素社会の実現に貢献できる。

※1　水分を完全に飛ばした粉体状のリグニンにおける炭素含有分析値から換算した試算値

木質バイオマス（リグニン粉末）

リグニンクリートスランプ性状

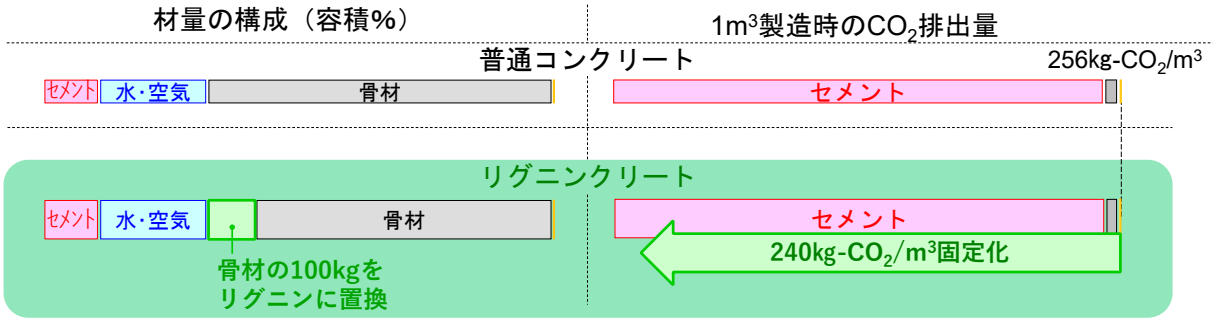
リグニンは粉末状で生コンクリートや生モルタル等に添加でき、専用の混和剤の使用で、適切なワーカビリティーを確保できる。打設後は特殊な養生が不要で、実用強度や耐久性を確保できる。砂の一部をリグニンに置き換えているため砂の使用量を削減でき、天然資源の保全にも貢献する。また、解体時にも CO_2 を固定したままリサイクル骨材として利用できるので、半永久的に CO_2 を固定できる。

普通コンクリート（左）
リグニンクリート（右）

硬化後のリグニンクリート断面

（２）CO_2 低減率の試算または実績

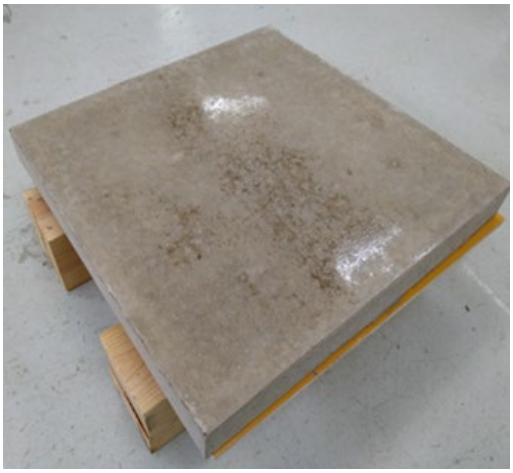
「リグニンクリート」は、1m³に対し最大で 100kg のリグニンを添加でき、その際の CO_2 固定化量は 240kg 程度となる。これにより、コンクリート製造時の CO_2 排出量とほぼ同量の CO_2 を固定できる。更に、高炉セメント B 種を用いることや、セメントの一部を産業副産物に置換することで、更なる CO_2 削減やカーボンネガティブの達成に貢献できる。



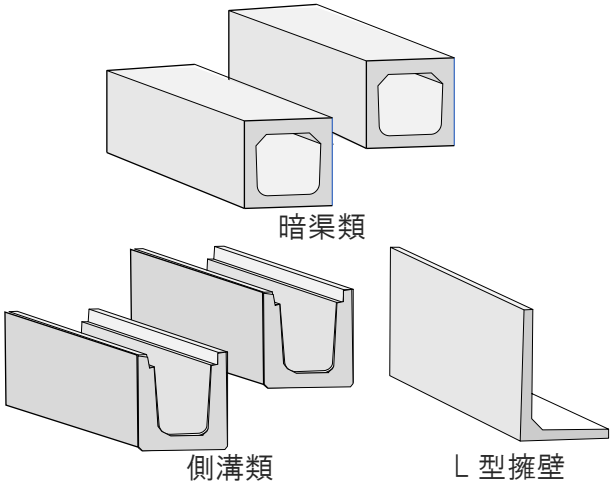
（３）今後の展望

建設分野の中でセメントやコンクリートは、鋼材とともに CO_2 排出量の多い建設材料となる。本技術は木質バイオマスのリグニンに着目しているが、コンクリートの中に長期間 CO_2 を固定することは、気候変動対策の一つとして貢献できると考えている。また、リグニンを添加しても従来のコンクリートと同等の耐久性を有することも求められている。

「リグニンクリート」の適用先は、ブロック等コンクリート製品を始めとして、今後、現場打ちコンクリートへ適用拡大する予定である。



リグニンクリート PCa 平版



適用可能コンクリート製品

ＥＣＭコンクリート　鹿島建設㈱　⑭

（１）技術概要

ECM®（Energy・CO_2・Minimum）コンクリートは ECM セメントを用いたコンクリートのことであり、ECM セメントはセメントの代わりに高炉スラグ微粉末を多量に使用し、耐久性と環境負荷低減を両立した材料である。ECM セメントは高炉セメント C 種（JIS 適合品）の範疇として使用可能であり、（株）竹中工務店、鹿島建設（株）、（株）デイ・シイ、日鉄高炉セメント（株）、東京工業大学、太平洋セメント（株）、日鉄セメント（株）、竹本油脂（株）の１大学、７企業で共同開発したものである。

①　高炉スラグ微粉末の使用によるセメント使用量の大幅削減

ECM セメントはセメント代替材として高炉スラグ微粉末を多量に置換（60～70%程度）しており、高炉セメント C 種（JIS 適合品）の範疇として使用可能である。そのため、ECM コンクリートは従来の中庸熱セメントを用いたコンクリートと比較し、CO_2 排出量を大幅に低減可能である。

これまでの高炉セメント C 種を用いたコンクリートは、スランプの継時変化が大きいことや初期強度が低い、収縮が大きいといった課題があった。それに対し、ECM コンクリートは、セメント組成の改良と専用の AE 減水剤を用いることでこれらを克服し、高炉セメント B 種とほぼ同等の性状を有するコンクリートとして使用することができる。

②　優れた温度ひび割れ抵抗性と経済性を実現

ECM コンクリートは、低発熱性のため温度ひび割れ抵抗性に優れており、マスコンクリートに適しているほか、場所打ち杭にも使用可能である。一般的なコンクリートで比較した場合、断熱温度上昇量は中庸熱セメントに対して約 10℃低減され、温度ひび割れの抑制に効果的である。

図 13.1　ECM セメント

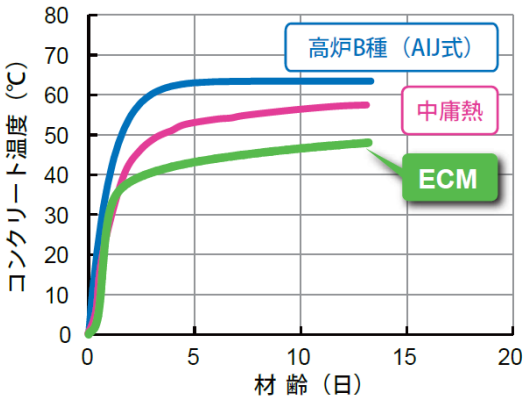


図 13.2　コンクリートの断熱温度上昇量

（２）CO_2 削減量および適用実績

① ECM セメントの CO_2 削減量

ECM セメントを用いたコンクリートと従来の中庸熱セメントを用いたコンクリートの CO_2 排出量の比較例を図 13.3 に示す。セメントの大部分を産業副産物である高炉スラグ微粉末に置き換えることで、約 60%の CO_2 排出量を削減可能としている。

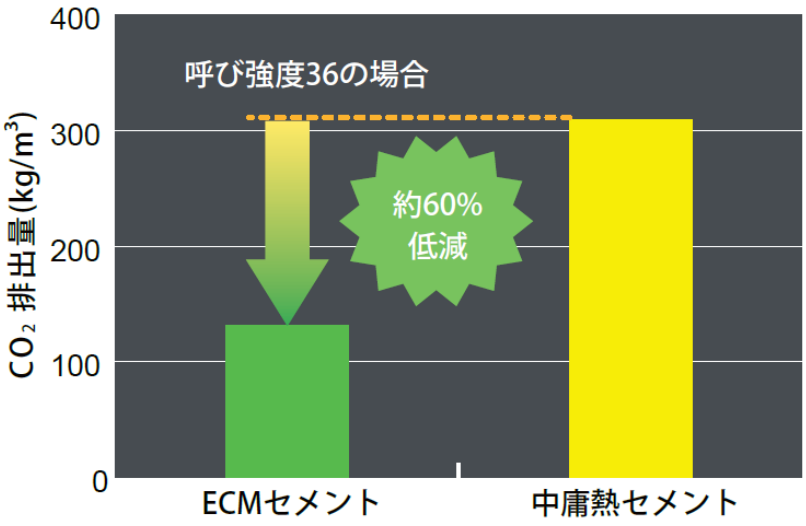


図 13.3　ECM セメントの CO_2 排出量比較例

② ECM コンクリートの適用実績

ECM コンクリートは東京都内、大阪、強度、北九州などで供給が可能であり、これまでに地下躯体のマスコンクリートや土木港湾施設などに使用され、累計約 38 万 m^3 の施工実績がある。

・事務所
・ホテル
・焼却施設
・土木港湾施設　ほか

（３）今後の展望

CO_2 排出量の削減と高い耐久性を両立する ECM コンクリートは、ひび割れ抵抗性にも優れており、発熱量が少ないことから部材断面が大きいマスコンクリートにも適している。一方で、主要都市では供給可能であるものの、供給範囲は限定的である。そのため、日本全国で供給可能となるよう取り組みを進めるとともに、土木構造物への普及拡大に努めて、低炭素社会実現への貢献を目指している。

スーパーグリーンコンクリート　前田建設工業㈱　⑯

（１）技術概要

「スーパーグリーンコンクリート」（ＳＧコンクリート）は、ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム、せっこうの一部または全部を組み合わせた低炭素型のコンクリートである。結合材に占めるポルトランドセメントの割合は、JIS に規定されるセメントの混合割合よりも小さく、30%以下となっており、混和材の割合が 70%以上を占めている。そのため、コンクリート中の材料由来の二酸化炭素排出量は、一般的なコンクリートに対して 20～40%に削減（削減率 60～80%）することができる。

ＳＧコンクリートは、設計基準強度 18～36N/mm^2 程度の構造物に適用が可能で、場所打ちコンクリートとして活用することを想定している。低発熱性や塩化物イオン浸透抵抗性を有しているため、マスコンクリート構造物や塩害環境にある構造物へ適用が有効である。また、アルカリシリカ反応の抑制対策としても効果が期待できる。一方、セメントの使用量が少ないため、中性化抵抗性は一般のコンクリートに比べると劣る傾向にある。

ＳＧコンクリートは、土木研究所が主催する共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として、大成建設株式会社と実施したものであり、土木学会コンクリートライブラリー152 号「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」の適用範囲に適合するコンクリートとなっている。

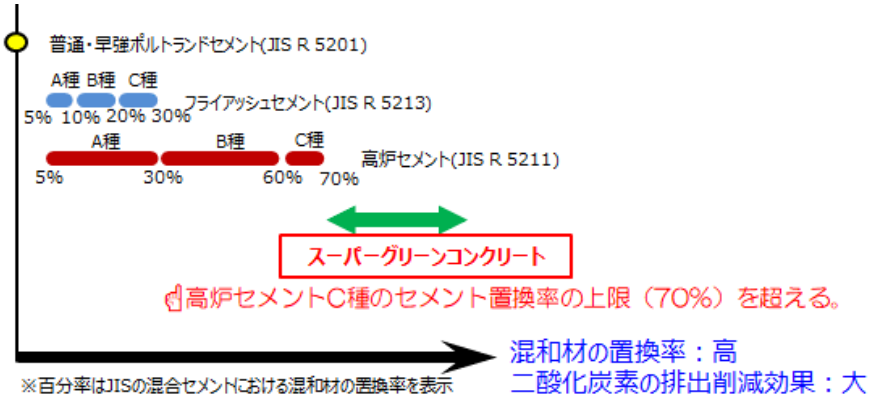


図 15.1　スーパーグリーンコンクリートの結合材の位置づけ

（２）CO_2 低減率の試算または実績

ＳＧコンクリートの代表配合として、図 15.2 に、H25BF（結合材割合：セメント 25%、高炉スラグ微粉末 45%、フライアッシュ 30%）と、H10BS（結合材割合：セメント 10%、高炉スラグ微粉末 85%、シリカヒューム 5%）のコンクリート 1m^3 あたりの CO_2 排出量を示す。いずれも呼び強度 24 相当（材齢 28 日）のコンクリートとして配合設計をしたもので、普通ポルトランドセメントのみを用いた水セメント比 55%の一般的なコンクリートに比べて、H25BF で 61%、H10BS で 81%の CO_2 排出量の削減効果を有している。

使用実績として、研究施設の床スラブへの適用が挙げられる。市中のレディーミクストコンクリートで製造・出荷し、68m^3 の施工を行った（図 15.3）。

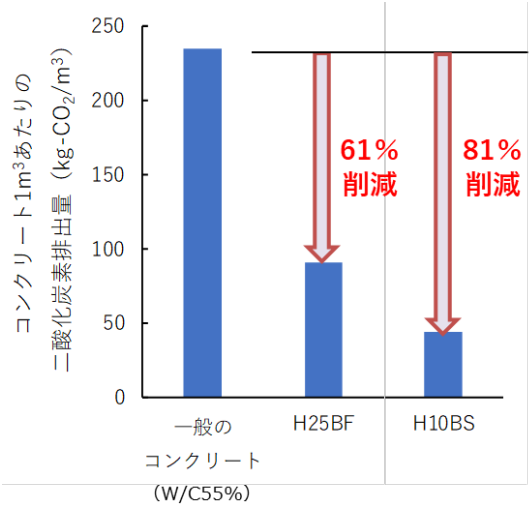


図 15.2　スーパーグリーンコンクリートの CO_2 排出量

低炭素型のコンクリート

低炭素型のコンクリートの施工状況

低炭素型のコンクリートの仕上げ状況

低炭素型のコンクリートの仕上げ完了後の状況

図 15.3　スーパーグリーンコンクリートの施工事例

（３）今後の展望

カーボンニュートラルに寄与するコンクリートの展開を図るには、耐久性等の設計方法の確立、CO_2 削減量の評価方法の標準化、第三者による認証制度の確立、インセンティブの付与など、信頼性を確保するための方策が必要となる。また、環境面とコストに配慮した混和材料の調達や、製造工場の選定にも課題を有しており、これらを解決するためには、業界全体での取組みも必要であると考えている。

LHC（ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート）㈱安藤・間　⑰

（１）技術概要

・普通ポルトランドセメント（N）、高炉スラグ微粉末（BS）、フライアッシュⅡ種（FA）を 6：2：2 の割合で混合した 3 成分系コンクリート。

・実用的に生コン工場では、N、高炉セメント B 種（BB）、FA を混合して LHC を製造出荷することも可能。

・呼び強度およびスランプは JIS A 5308 の範囲。

・一般のコンクリートと同様な製造、施工、品質管理が可能。圧送性が改善。

・コンクリートの発熱量が少ないので、温度ひび割れの抑制効果（LHC＞BB＞N）あり。

・水結合材比 55%の場合、N 比で初期強度は下回るものの、材齢 3 日において鉛直面の脱型強度 5N/mm² を十分に満足し、材齢 56 日以降の長期強度で上回る。

・特許第 6177534 号

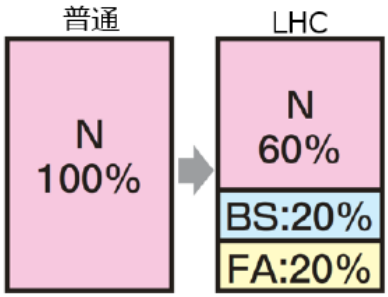
・呼び強度、スランプの範囲、強度発現に問題なければ特に制約なし。

（２）CO_2 低減率の試算または実績

・CO_2 排出量 約 45%（普通ポルトランドセメント使用時と比べた場合）

（３）今後の展望

・本技術は高炉セメント B 種（BB）の性能を改善させたもので、これまでと同様、適用箇所があれば積極的に展開していく所存である。



結合材の材料比率

厚幌ダム閉塞工事での打設状況

BBFA 高強度コンクリート　㈱安藤・間　⑱

（１）技術概要

・高炉セメント B 種（BB）、フライアッシュⅡ種（FA）を 8：2 の割合で混合したコンクリート。

・呼び強度の範囲 46～73、スランプの範囲 18～23cm、スランプフローの範囲 50～65cm。（一部、JIS A 5308 の範囲外）

・コンクリートの発熱量が少ないので、温度ひび割れの抑制効果（BBFA＞BB＞N）あり。

・一般のコンクリートと同様な製造、施工、品質管理が可能。

・コンクリートの発熱量が少ないので、温度ひび割れの抑制効果（LHC＞BB＞N）あり。

・呼び強度、スランプの範囲、強度発現に問題なければ特に制約なし。

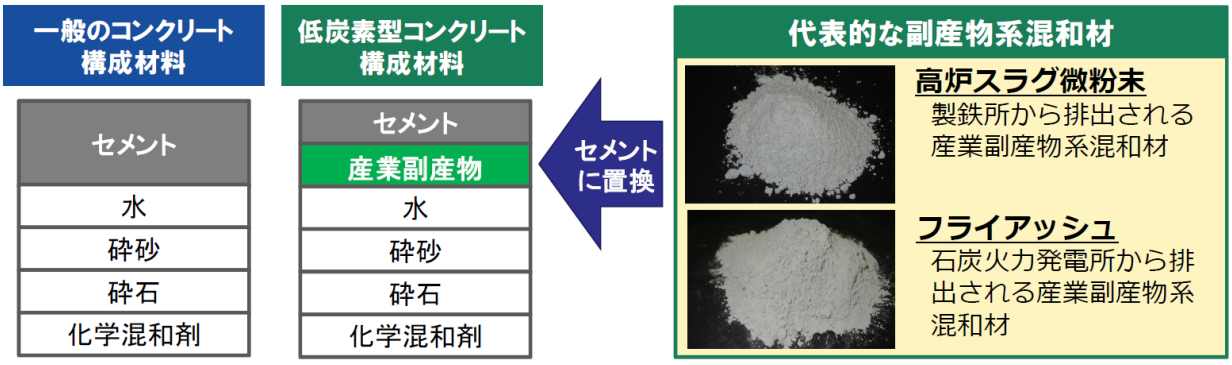
（２）CO_2 低減率の試算または実績

・CO_2 排出量 約 50%（普通ポルトランドセメント使用時と比べた場合）

（３）今後の展望

・これまで生コン工場と共同で大臣認定を取得（品質が確保）しており、今後更に適用工場を増やし、技術展開先を拡大していく予定である。

→大臣認定取得生コン工場：首都圏 2 工場、仙台地区 3 工場



アッシュクリート ㈱安藤・間 ⑲

（１）技術概要

・石炭灰原粉を主材料とし、水（海水）とセメント（N、BB）で混合した硬化体。
・必要最小限の水で混合し、振動を加えて流体化する（超流体化工法）。
・陸域使用の場合、有害元素の溶出対策として石膏の添加量を調整する。
・金属スラグを用いて比重調整可能。
・海域では、人工海底山脈や消波ブロックでアッシュクリートブロックの使用実績あり。
・陸域では、盛土造成材、路盤材の適用実績あり。
・石炭灰由来の有害元素(例えば六価クロム、砒素、セレン、ふっ素、ほう素)が溶出する可能性がある。
・使用材料や配合によって対策を施していることから、溶出リスクの少ない海域での利用、盛土造成材での利用に際しては問題無いが、適用箇所によっては留意が必要である。
・これまでの累計石炭灰原粉使用量は 170 万 t を超える実績がある。

（２）CO_2 低減率の試算または実績

・CO_2 排出量 約 40%（圧縮強度 30N/mm^2 のコンクリートと比べた場合）
・廃棄物利用：石炭灰原粉 1,000～1,200kg/m^3（目標強度による）

（３）今後の展望

・これまでと同様に陸域での展開を継続するとともに、海域での適用も視野に入れている。
・石炭灰以外の灰（例えば、バイオマス灰）を適用することで、カーボンニュートラルに向けた幅広い技術展開を考えている。

アッシュクリートの製造状況および破砕材

ジオポリマー（ジオポリー）西松建設㈱ ⑳

（１）技術概要

ジオポリマーは、1988 年にフランスの Davidovits により提唱された。ジオポリマーは、アルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末との反応によって形成される非晶質の縮重合体（ポリマー）の総称である。コンクリートの分野では、アルカリシリカ溶液として珪酸ナトリウム水溶液や水酸化ナトリウムを、活性フィラーとしてフライアッシュや高炉スラグ微粉末などを使用することが多い。

ジオポリマーの材料製造時に発生する CO_2 の排出量は、セメントのそれに比べ少ない。ジオポリマーで構造物を建設した場合、セメントで建設するより最大で 80%程度 CO_2 を削減できると試算されており、次世代のコンクリートのバインダーとなりうる可能性を有している。また、活性フィラーとしては、フライアッシュや高炉スラグ微粉末以外にも、都市ゴミ焼却灰溶融スラグ微粉末や下水汚泥溶融スラグ微粉末なども使用でき、産業副産物の有効利用の観点からも優れた技術である。

ジオポリマーの構成元素はセメントコンクリートと異なり、Ca の代わりに Na や K を多く含むため、固化体の性状がセメントコンクリートと大きく異なる。例えば、耐酸性や耐熱性等が、セメントより優れているとの報告が多い。さらに、ジオポリマーは、アルカリ骨材反応によるひび割れを抑制することも期待できる。

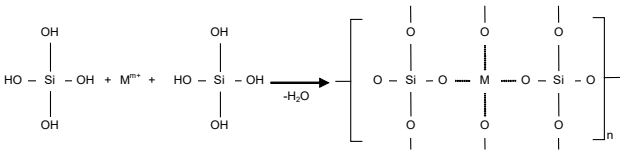
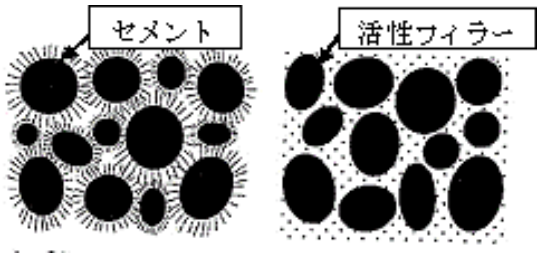


図 19.1　ジオポリマーの固化概念図



(a) セメント　　(b) ジオポリマー

図 19.2　固化形態イメージ

（２）CO_2 削減率の試算または実績

ジオポリマーの CO_2 削減率の試算例を下記に示す。試算に用いたセメントコンクリートの配合は、実際に二次製品メーカーで使用しているものである。

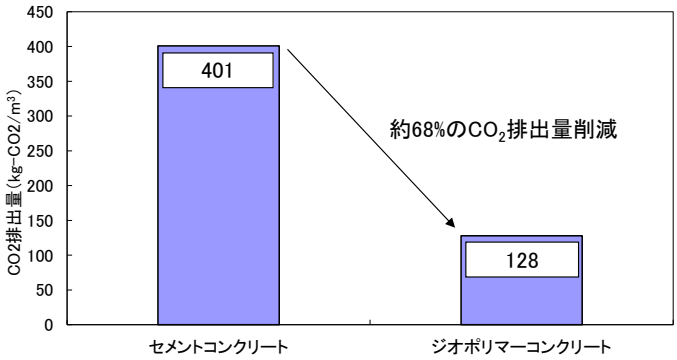


図 19.3　CO_2 削減率

施工実績は、試験施工等も含めて多数あるが、写真 19.1 には大分県発注の「平成 27 年度道改単別第 3 号道路改良工事」で施工されたジオポリマー製境界ブロックを示す。2023 年 4 月では、施工本数は 150 本以上、施工延長は 100m 以上の実績となっている。

写真 19.1　施工状況

（３）今後の展望

当社は、ジオポリマーのリーディングカンパニーとして、我が国の研究開発を牽引してきた。その成果として、今では多くの研究機関、民間企業等でジオポリマーへの取り組みがなされている。セメントの開発・実用化もそうであったように、新材料に関しては多くの機関が協力して研究開発を進めないと実用化を望めない。今後の、ジオポリマーの発展を大いに期待するところである。

なお、当社では、今後増えるバイオマス発電所から排出されるバイオマス灰を用いたジオポリマーの研究を ERCA の補助金で進めており、2023 年度にはある程度の成果を得らえる予定である。さらには、ジオポリマーの材料が、産業副産物であることから地産地消材料として活用の可能性があることに注目して、2022 年度から沖縄 TLO の補助金を活用することにより、「琉球ジオポリマー」の開発を開始して、地元企業・大学とタッグを組み、検討を進めている。

以上

ＡＡＭコンクリート　西松建設㈱　㉑

（１）技術概要

AAM（Alkali Activated Materials：アルカリ活性材料）コンクリートは、製鉄所から排出される副産物の高炉スラグを粉体や細骨材として使用し、アルカリ溶液で反応・硬化させたセメントフリーの環境配慮型コンクリートである。強度発現性や耐凍害性に優れ、現場施工や二次製品への利用も可能な建設資材であり、西松建設(株)、JFE スチール(株)、東北大学、日本大学が共同開発したものである。

① 産業副産物の利用

ポルトランドセメントに比べて、製造時の CO_2 排出量が大幅に少ない産業副産物の高炉スラグを材料（粉体、細骨材）として利用することで、普通コンクリートに比べて、製造過程で発生する CO_2 排出量を低減している。

② 製造・運搬

一般的なコンクリート用ミキサでの製造が可能であり、アジテータ車による運搬も普通コンクリートと同様にできる。

③ 現場打ち施工

独自の配合設計ノウハウにより、施工に適した流動性と材料分離抵抗性を有しつつ、施工条件に応じた可使時間の調整が可能である。これにより、現場の生産性向上にも寄与する。また、常温大気下での強度発現性に優れており、材齢 1 日で 10N/mm² 以上、28 日で 30N/mm² 以上の圧縮強度が得られる。

写真 20.1　フレッシュ性状の確認

写真 20.2　土間での流動充填性

④ 耐凍害性

寒冷地での凍結防止剤の散布による塩害と凍害の複合劣化を想定し、塩水浸漬による凍結融解試験を実施しており、AAM コンクリートは所要の凍結融解抵抗性を有していることを確認している。

（２）CO_2 削減量および適用実績

① AAM コンクリートの CO_2 削減量

同程度の強度を有する普通コンクリート（呼び強度 24 クラス）と AAM コンクリートの製造時における CO_2 排出量の比較例を右図に示す。セメントを使用せず、産業副産物の高炉スラグを粉体と細骨材に利用することで、CO_2 の削減量は 70%以上となる。

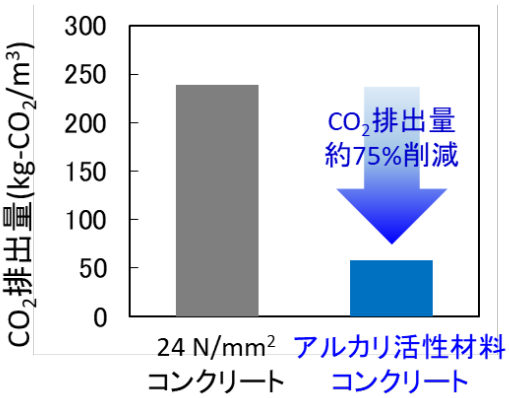


図 20.1　CO_2 排出量比較例（製造時）

② 適用実績

現場打ちへの適用やプレキャストコンクリート製品の試作を実施している。

・のり面保護コンクリート
・建屋基礎補強（増し打ち）
・土間コンクリート
・護岸積みブロック（試作）　他

写真 20.3　のり面保護コンクリート

写真 20.4　建屋基礎補強（増し打ち）

写真 20.5　土間コンクリート

写真 20.6　護岸積みブロック

（３）今後の展望

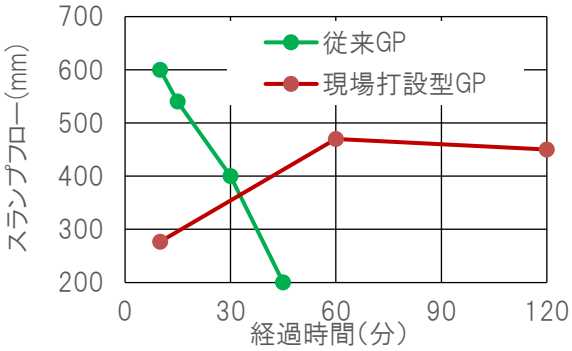
現状では、主に非構造部材への現場適用を行っているが、構造部材への適用に向けて性能検証に取り組む計画である。また、プレキャスト製品の早期商品化を目指している。

現場打設型ジオポリマー「ポリマークリート®」　㈱大林組　㉒

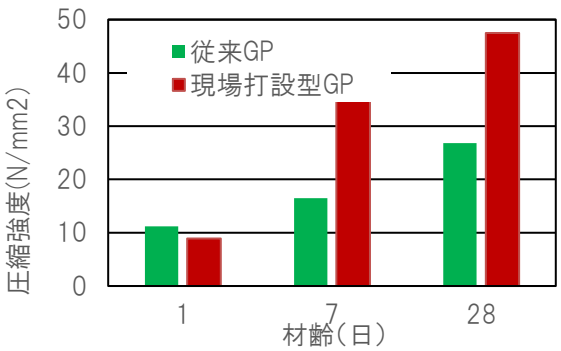
（１）技術概要

製鉄所内ＲＣ擁壁断面補修適用事例

ジオポリマーは、火力発電所の副産物であるフライアッシュや、製鉄時の副産物である高炉スラグ微粉末を主原料としたアルミナシリカ粉末にアルカリ溶液を加えることで、固化する性質を利用した、セメントを使用しない固化体である。CO_2 排出量は、普通コンクリートの 20～35%となり、耐熱性が高く、高温環境下での耐久性に優れている等の特徴も有している。一方、これまでジオポリマーは、可使時間が非常に短く、必要な強度を確保するには熱養生が必要となるため、工場で製作される二次製品でのみ使用されていた。現場打設型ジオポリマー「ポリマークリート」は特殊な分散剤の添加により、打設に必要な可使時間を確保しコンクリートポンプ車での打設も可能となった。また、現場の常温養生で圧縮強度を発現する。これにより、従来のジオポリマーに対して適用範囲が大幅に広がった。これまでに、熱により劣化した壁の表面を 10 ㎝の厚さで断面修復する工事で適用し、施工性と常温での強度発現を現場施工でも確認済みである。



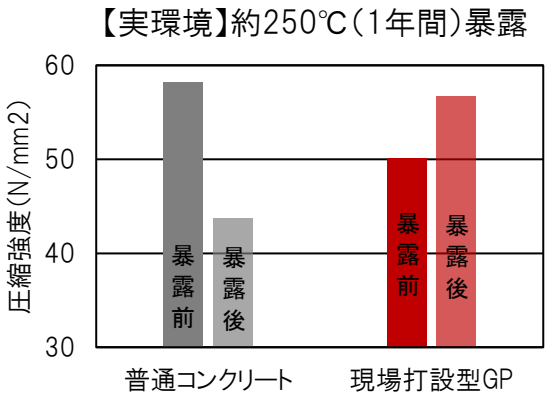
スランプフロー



圧縮強度(常温養生)

従来ジオポリマーと現場打設型ジオポリマーの比較

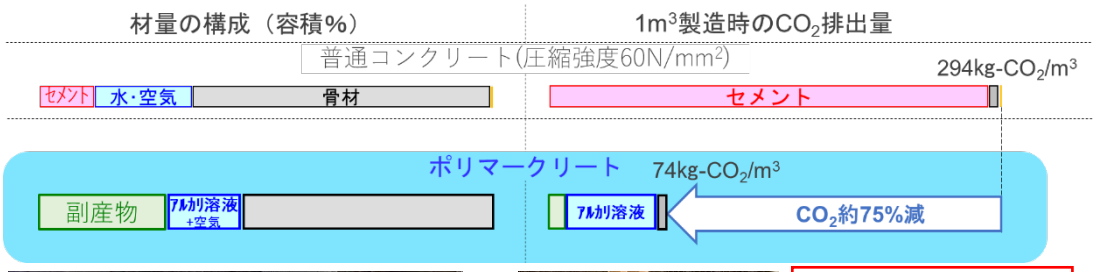
「ポリマークリート」は、従来のジオポリマー同様に普通コンクリートに比べて耐熱性に優れている。暴露試験（環境温度 250℃で１年間）では、普通コンクリートの圧縮強度が 25～30%程度低下するのに対し、ポリマークリートの圧縮強度は 10%程度増加することを確認した。環境温度が 250℃程度までならばポリマークリートの圧縮強度はほとんど変化がない、あるいは増加することがこれまでの実験で確認できている。

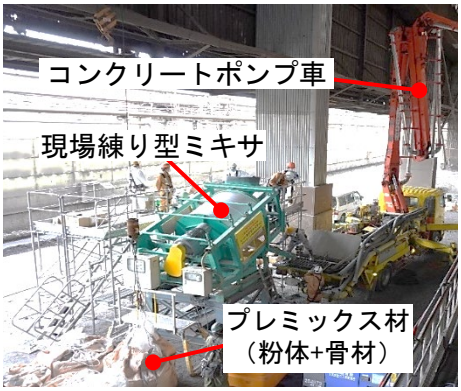


高温環境暴露前後 圧縮強度比較

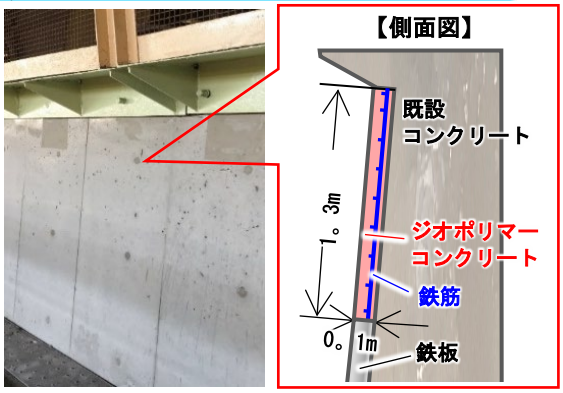
（２）CO_2 低減率の試算または実績

製鉄所内鉄筋コンクリート擁壁断面補修工事で使用したジオポリマーの配合から試算すると、ジオポリマーの CO_2 排出量は約 74kg/m³ となる。これは、同等強度を有する普通コンクリート（約 294kg/m³）の約 25%（75%減）と、大幅な排出量削減となる。また、ジオポリマーの原材料として、フライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物の有効利用ができ、環境保全に貢献できる。





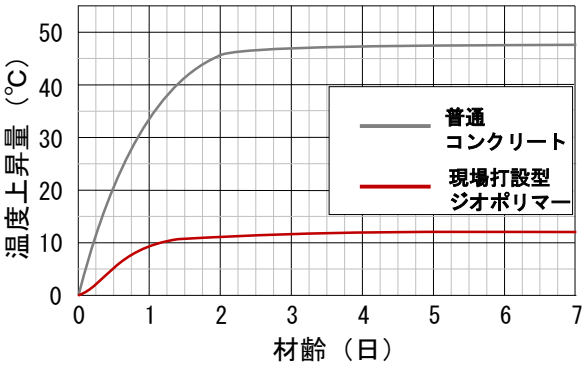
製鉄所内ＲＣ擁壁断面補修打設状況



ポリマークリート適用部位

（３）今後の展望

「ポリマークリート」の適用範囲拡大に向けて各種試験を実施中である。断熱温度上昇試験では、セメントコンクリートと比較して硬化時に発生する発熱量が極めて少ないため、マスコンクリートに採用した場合、温度ひび割れ対策となる可能性がある。また、圧送試験では、水平換算距離約 250m の長距離圧送後でもフレッシュ性状は良好であり、圧送後の圧縮強度発現にも影響がないことを確認している。今後は、低炭素型材料や耐熱性が高い材料としてだけではなく、長距離圧送でのマスコンクリートにも適用範囲が拡大することが期待される。



断熱温度上昇試験結果

圧送後筒先排出状況

サスティンクリート®（Sustain-Crete®）三井住友建設㈱ ㉓

（１）技術概要

サスティンクリートは、材料に由来する CO_2 排出量を 40%～90%削減する環境配慮型コンクリートである。高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフュームなどの産業副産物の特性を考慮し、配合の最適化を図ることによって、様々な構造物の要求性能を満足しつつ CO_2 排出量が多いポルトランドセメント（以下、セメント）の使用量を極力低減する。

サスティンクリートは以下の 3 つの特徴がある。

① CO_2 排出量を大幅に削減可能

通常のコンクリートよりもセメント量を少なくすることにより、CO_2 排出量を 40%以上削減する。セメントを全く使用しない条件（ゼロセメントタイプ）においては最大で約 90%の削減が可能である。

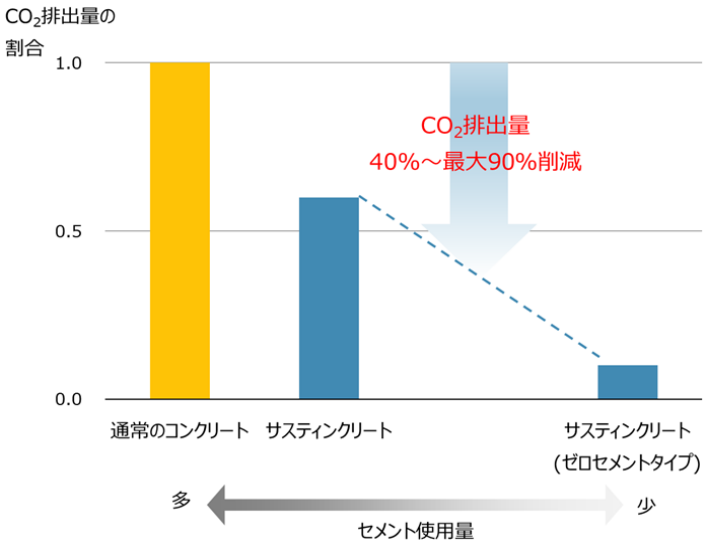
② 普通強度から超高強度（設計基準強度 220N/mm²）に対応

一般的な環境配慮型コンクリートより強度範囲が広いコンクリートである。超高強度のコンクリート部材は、普通強度のコンクリート部材と比べてより多くのセメントが必要となるが、サスティンクリートは超高強度の部材においても使用するセメント量を少なくでき、CO_2 排出量を削減することができる。

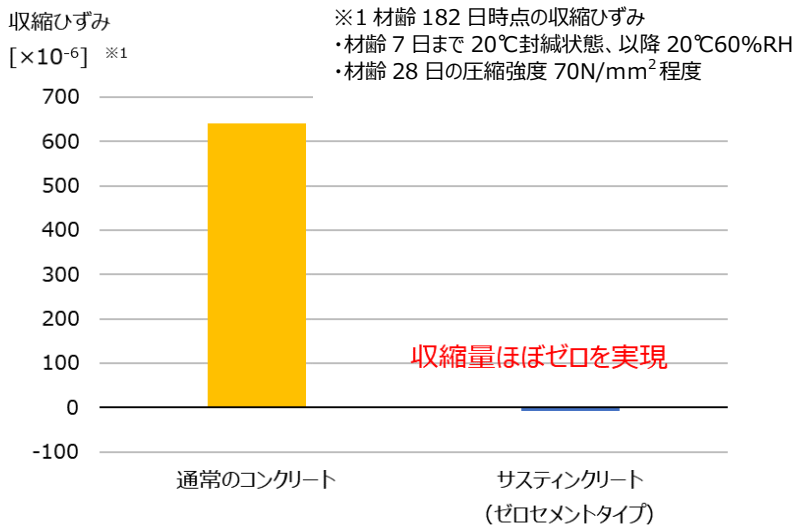
③ 超低収縮の性能を付加した特別な配合も可能

産業副産物でもある特殊な細骨材（フェロニッケルスラグ）を活用した配合とすることで、超低収縮の性能を付加することが可能である。これによりコンクリートの収縮ひび割れのリスクを大幅に低減することが可能になり、構造物の耐久性がより向上する。

収縮ひび割れを回避したい構造部材・部位や、通常のコンクリートでは収縮ひび割れが発生し、成形が難しい複雑なデザインの部材・造形物などにも適用可能である。



サスティンクリートの CO_2 排出量



超低収縮性能を付加した場合の収縮特性

（２）CO_2 低減率の試算または実績

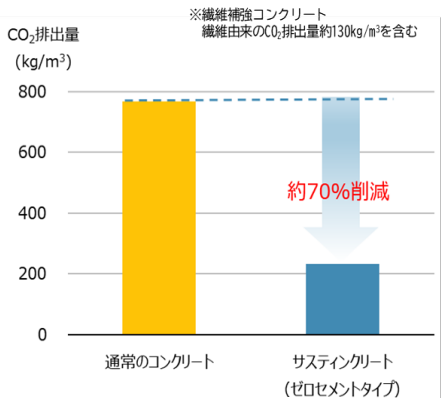
【適用例】

セメント不使用・超低収縮タイプのサスティンクリート（短繊維補強）と腐食しないアラミド FRP ロッドを組み合わせた「環境配慮型高耐久 PC 橋梁」に適用した。

・高強度（140N/mm²）、短繊維補強材を入れた配合において、CO_2 排出量を 70%削減した。

・超低収縮の性能を付加することで、収縮量ほぼゼロを実現した。

プレストレストコンクリート桁の架設状況



CO_2 排出量

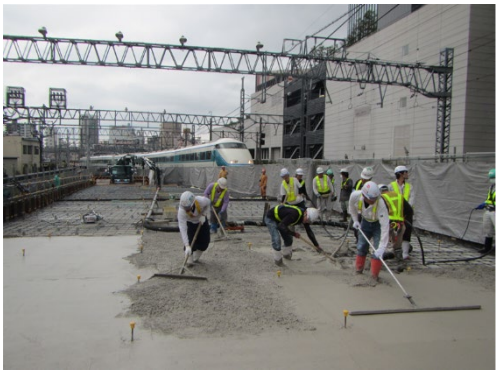
（３）今後の展望

脱炭素社会の実現に向け、「サスティンクリート」の更なる開発を進め、インフラ更新事業における老朽化した高速道路橋などの床版の取替工事などへの採用に向け提案していく所存である。

クリーンクリート　㈱大林組　㉕

（１）技術概要

「クリーンクリート」は、セメントを高炉スラグ微粉末･フライアッシュ･シリカフュームなどの産業副産物（混和材）に 60～90%置き換えることで、最大 80%程度の CO_2 排出量を削減することが可能な低炭素型のコンクリートである。施工性･強度などは通常のコンクリートと同等であり、低発熱･塩害に対する高い耐久性等の特徴がある。特に高炉スラグ微粉末のみを 65～75%程度（残りの 35～25%はポルトランドセメント）使用する構成を標準としている。「クリーンクリート」に使用する高炉スラグ微粉末は JIS 規格品であれば産地･構成等を選ばない。また、JIS 規格品の高炉スラグ微粉末と専用の混和剤、およびそれらのためのサイロ･薬剤ビンのみ確保出来れば良く、プラントの負担を最小限に抑制することが可能である。これらの特徴による汎用性の高さから、2010 年の開発･実用化以降、2023 年 1 月末までに土木建築合わせて約 100 件 37 万 m^3 以上、CO_2 排出の総削減量は約 6.5 万 t と建設業最大の実績を有している。また、公的認証として、日本建築総合試験所の建築材料技術証明を取得し、NETIS（KT-130003-VE）や J-クレジット制度に登録済み、国立研究開発法人土木研究所との共同研究報告書 471 号～476 号にも、その性能が取りまとめられている。

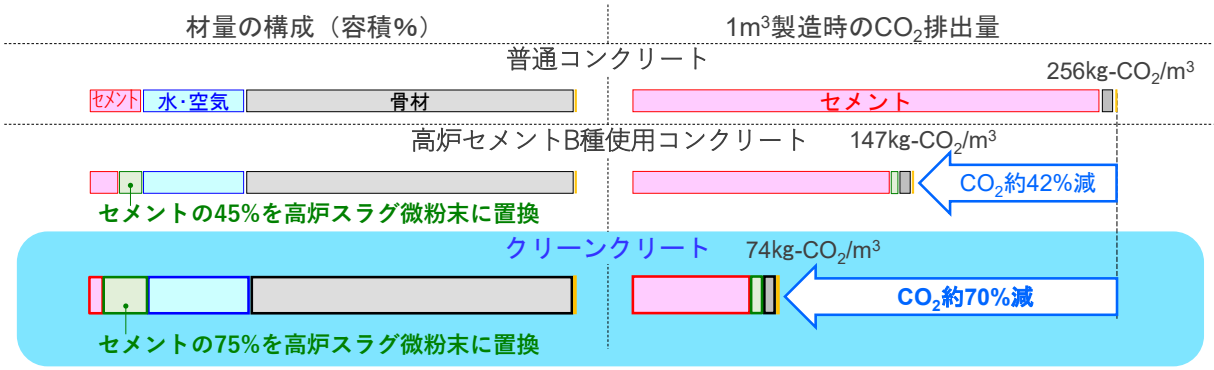


とうきょうスカイツリー駅切替線床版

東名阪　弥富高架橋 PCa 仮設防護柵

（２）CO_2 低減率の試算または実績

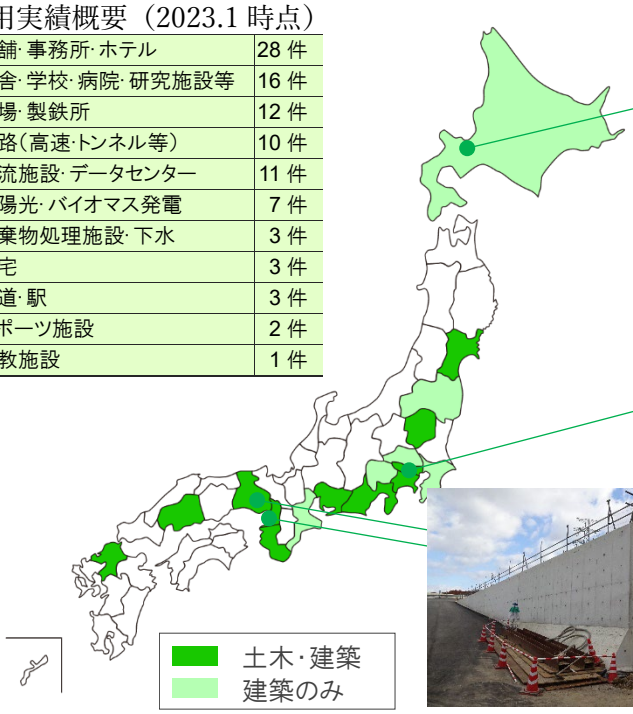
「クリーンクリート」の標準配合では、CO_2 排出量が 760～770 kg-CO_2/t 程度であるポルトランドセメントの 75%を高炉スラグ微粉末（24～36 kg-CO_2/t）に置換することで、CO_2 を約 70%削減することが可能である。



施工実績は 2023 年 1 月末までに土木建築合わせて約 100 件 37 万 m^3 以上、CO_2 排出の総削減量は約 6.5 万 t と建設業最大の実績である。

クリーンクリート
適用実績概要（2023.1 時点）

店舗･事務所･ホテル	28 件
庁舎･学校･病院･研究施設等	16 件
工場･製鉄所	12 件
道路(高速･トンネル等)	10 件
物流施設･データセンター	11 件
太陽光･バイオマス発電	7 件
廃棄物処理施設･下水	3 件
住宅	3 件
鉄道･駅	3 件
スポーツ施設	2 件
宗教施設	1 件



エスコンフィールド HOKKAIDO

中央環状品川線大井地区トンネル

神戸 JCT

大阪夢洲 ひかりの森メガソーラー

クリーンクリート適用実績

（3）今後の展望

・適用拡大

現状は低炭素型のコンクリートを設計段階から盛り込みやすい建築工事での適用が進んでいるが、今後は土木工事でも一層の適用拡大が求められる。そのためには、現場打ちの鉄筋コンクリートやプレキャストコンクリートへの適用拡大が重要となる。地上部鉄筋コンクリートへの適用は、中性化への対応が不可欠である。一例として、プレキャスト埋設型枠内部への充填コンとしての適用や、耐久性に優れるクリヤ塗料による中性化抵抗性の付与による打放し壁部材への適用が建築案件で進んでいるので、土木分野でも展開することが考えられる。

エスコンフィールド HOKKAIDO
大屋根ガーダー架構埋設型枠内部に適用

当社技術研究所内施設
クリーンクリート+クリヤ塗料外壁

・適正コスト

各社の低炭素型コンクリート用スラグの共通化や、CO_2 削減効果の評価手法の統一を経た適切な価格設定により、低炭素型コンクリート全体として適用が広がることが望ましいと考える。

「スラグリート®」　戸田建設㈱　㉗

（１）技術概要

「スラグリート®」とは、セメントの質量比70～90%を製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型のコンクリートである。「スラグリート®」を使用することで、コンクリート製造時における二酸化炭素の主たる排出源となるセメントの使用量を大幅に低減することが可能となり、普通コンクリートと比較してCO_2排出量を約65～85%削減することができる技術である。

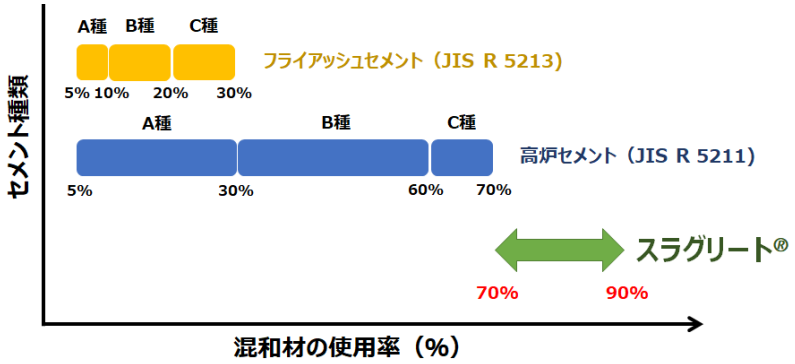


図 26.1　「スラグリート®」の混和材使用率

以下に「スラグリート®」の特徴を示す。

① セメントの 70～90%を高炉スラグ微粉末に置換することで、CO_2 排出量を 65～85%程度削減することができる。

② 普通ポルトランドセメントや高炉 B 種セメントを使用したコンクリートと比較して、温度ひび割れの低減効果が期待できる（図 26.2 参照）。

③ 流動性や圧送性などのフレッシュ性状は、一般的なレディーミクストコンクリートと大きな違いはなく、普通コンクリートと同様に打設可能である。

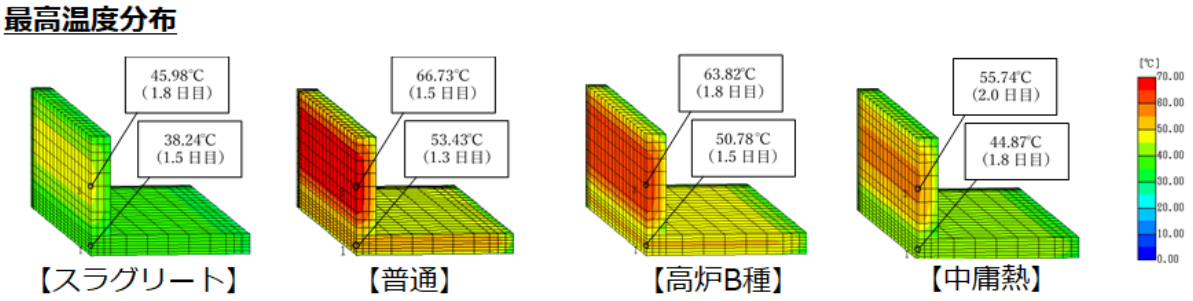
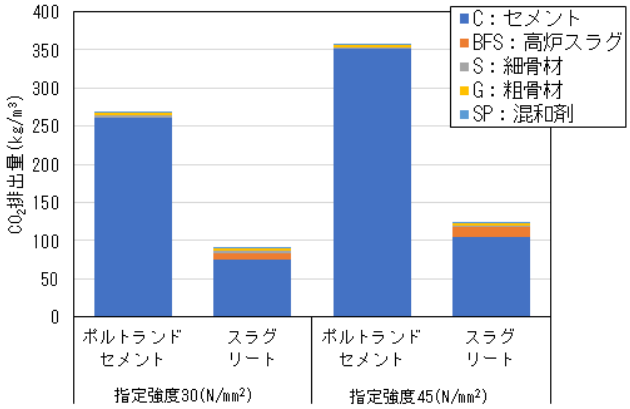


図 26.2　壁状部材の温度解析結果

（２）CO_2 排出量の試算

普通ポルトランドセメント製造時の CO_2 排出量は、1 トン当り約 760kg であり、コンクリート製造時の CO_2 排出量の大半を占める。

セメント質量の 70%を高炉スラグ微粉末に置換した「スラグリート®」の場合、普通ポルトランドセメントを用いた同一強度の配合と比較して、CO_2 排出量を 65%程度削減できる（図 26.3 参照）。



※（セメント質量 70%を高炉スラグ微粉末に置換した場合）

図 26.3　コンクリート製造時の CO_2 排出量削減効果

*1 骨材および混和剤 CO_2 原単位は土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）2005 年を基に作成。

※ただし、高炉スラグ微粉末 4000 を用い、CO_2 原単位を 40.4kg/t と仮定した場合。

（３）実績

・造成工事における擁壁
・戸田建設（株）技術研究所、グリーンオフィス棟（写真 26.1）
・戸田建設（株）技術研究所敷地内、共同溝（写真 26.2）
・戸田建設（株）「TODA BUILDING」、耐圧スラブ（写真 26.3）

写真 26.1 グリーンオフィス棟

写真 26.2　共同溝

写真 26.3　耐圧スラブ

（４）技術登録・評価取得

・NETIS　　登録番号：QS-210008-A
・建設材料技術性能証明　性能証明番号：GBRC 材料証明 第 20-01 号
・エコリーフ　　登録番号：JR-BY-23001E(スラグリート®70(呼び強度 40 以下))

（５）今後の展望

脱炭素社会の実現に向けた取組みの一つとして、土木・建築分野の実構造物に対して、積極的に普及、展開を図っている。また、土木分野においては、適用範囲の拡大向け、コンクリート二次製品等への適用について検討を行っている。