

5. 総合検討

5.1. 市場構造から見た石炭灰利用可能性

石炭灰の分野別の有効利用は、表 5-1 の通りまとめることができる。

表 5-1 石炭灰の分野別利用状況

利用分野	利用項目
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
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、炭鉱充填材
建築分野	建材ボード、人工軽量骨材、コンクリート2次製品
農林・水産分野	肥料（含 融雪材）、魚礁、土壤改良剤
その他	下水汚水処理剤、製鉄用、その他

平成 10 年代から 20 年頃にかけて、石炭灰発生量は年間 700 万トン前後から 1,000 万トンを超える伸びを見せつつ、有効利用率も大きく向上した。しかし、近年においては発生量・有効利用量とも、は 1,200 万トン前後で推移しており、大幅な増加に転じることはなく頭打ちになっている傾向にある。石炭灰の排出量は、今後も増加することを考慮すると、新しい有効利用法の開拓は急務であり、今後、安定的かつ大量の石炭灰有効利用法を確立することが求められている。

石炭灰の特性を整理すると表 5-2 の通りであり、大量集中発生、発生量調整困難、性状の変化等が特徴となっている。

表 5-2 石炭灰の各種特性

カテゴリー	項目	内容
発生の態様	集中	● 一か所で集中して大量に発生する（建設副産物などと異なる特徴）
	変動・調整	● 季節変動が少なく、大量かつ継続的に発生する。 ● 在庫調整は可能だが、発生量の調整や、廃棄による出荷調整は不可能。
品質管理	均質性	● おおむね均質。 ● 原料炭（週単位で変更することもある）や燃焼条件の違いにより未燃炭素量や微量物質が若干変化する。
発生場所	分布	● 全国的にはほぼ満遍なく分布。 ● 関東・関西の大都市圏は少ない。
	立地	● ほぼすべて海岸立地。 ● 大型船が停泊可能な港湾施設を備えるものが多い。
	地方	● 一部を除いて小都市や地方の辺鄙な場所に立地し、大都市圏から遠いケースが多い（鉄鋼スラグなどと異なるポイント）
保管・運搬	フライアッシュ	● 粉塵飛散防止のため、容器内に保管する必要がある。 ● 粉末状態で専用の車両や船舶で運ぶか、スラリー状にして運ぶ。
	クリンカアッシュ	● 化学的に安定しており、野積みで保管可能。 ● 軽量なので輸送（車両・船舶）しやすい。

特許庁のデータベース「特許情報プラットフォーム (J-Plat Pat)」によれば、「石炭灰」をキーワードとする発明は、2,729 件がヒットしている。このことは、石炭灰の有効利用に向けて研究開発の努力が払われてきたことを示している。しかし、それら技術シーズの多くは、審査請求がされていない

状況にあり、現時点で技術的な成熟度や実用化の可能性も未知数である。

土木学会が行った石炭灰有効利用拡大に関する検討の中では、すでに製品化された事例を収集分類・分析評価を行っている（表 5-3）。

表 5-3 土木学会による石炭灰有効利用拡大に関する検討結果

工種	用途	事例数
土木	土工	全般、盛土材、埋戻材、中詰材、裏込材、充填材
	コンクリート工	混合セメント、コンクリート用混和材、コンクリート用骨材、吹付用混和材、高流動コンクリート
	固化体	各種ブロック等硬化体
	地盤改良工	深層混合処理 SCP工法表層処理工法
	道路工	アスファルト・フィラー材、アスファルト用骨材、凍上抑制層材、路盤材、路床改良
	その他	地中連続壁、管中混合処理、鉛直遮水工
その他	環境改善剤（人工ゼオライト）、ポリエチレン製品用フィラー、法面緑化吹付厚層基盤材、育苗培土、植栽土壤改良剤、堆肥副資材水分調整材、水質浄化・改善材、研磨剤、グラウンド等材料	9

土木学会「石炭灰有効利用技術について－循環型社会を目指して－」を基に作成

これらの過去の石炭灰利用拡大に向けた検討状況を見ると、石炭灰が持つ多様な特性に着目し、それを生かした製品や工法等であり、広く建設業界向け活用が主に想定されつつ、一部、農業や環境技術、工業用の新製品も含んでいる。

しかし、これらの製品や工法は期待されたほどの成果を上げていないとの報告もあり、実用化実績が乏しい状況であることは否めない。

鉄鋼スラグや建設副産物の有効利用率は向上していることからも、必ずしも受入市場に縮小等の大きな変化があったとは判断できない状況において、石炭灰活用が伸び悩んでいる一因として、開発現場の思いと受入側の需要・要望とのミスマッチや乖離が起こっている可能性が考えられる。

上述の土木学会の技術分析評価においても、11 の項目について利用効果・特徴が整理されている一方で受入側観点からの評価項目（例えば、競合優位、価格競争力等）が全く含まれていないことが、このような現状を端的に表しているとも言える。

技術シーズに基づく製品開発、つまり「プロダクトアウト」が先行している傾向が高い現状を見直して顧客ニーズを取り入れた商品開発、つまり「マーケットイン」の発想を取り入れることが重要である。

5.2. 過去の施工事例から見た石炭灰利用可能性

港湾設備における実績によれば、石炭灰は、FA がコンクリート工・本体工・土工に、二次製品が舗装工とその他にそれぞれ用いられていた。また、用途別にみて石炭灰関係を含めて多様なリサ

イクル材料が活用されているのは、中詰材を筆頭に、路盤材や、藻場等の関連施設・整備においてであった。これら実績のある分野については、洋上風力発電設備の整備に関して同様の需要があると考えられる事例への積極的なアピールを行いつつ、港湾における実績の現場の状況についても、長期間を経過することによる劣化の顕在化などが生じていないかを今後も注視していく必要がある。

一方で、要求性能やアニュアル整備状況からみて石炭灰の有望用途と目される、被覆石・根固・消波ブロックや裏込材・裏埋材については、リサイクル材料としての石炭灰が港湾整備実績に結びついていない現状がある。

3.3.1 項において港湾施設におけるリサイクル材料の活用について材料別・用途別に整理して考察を加えている。材料別にみた場合にほぼ共通する課題は、「材料の品質のばらつき」、「材料の安定供給(需要時期との適合も含む)」、「安全性(環境や生態系への影響)」となっていた。一方、用途別の観点では「施工性(施工時の利便性・安定性)」「耐久性(施工後において、劣化や性質の変化が少ないこと)」「安全性(環境や生態系への影響)」のいずれか、またはそれらが複合して要求事項となっていた。

これらが、リサイクル材料を使用する側の基本的な問題意識やニーズであることを念頭に、石炭灰の特性を活かす、あるいは他のリサイクル材料との配合も含めた重量の調整など弱点のカバー(調整可能性があることは、用途によっては利点にもなり得る)、等の方策を検討してゆくことが必要である。

5.3. 各方面へのヒアリング結果から見た石炭灰利用可能性

各方面へのヒアリング結果をふまえて石炭灰利用可能性を整理した。

5.3.1. 港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等から見た今後の石炭灰利用可能性

全国の港湾施設等では、国交省の定めた「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」や各種マニュアル等の整備により、石炭灰を含む各種リサイクル材料を活用した施工実績は認められ、今後も非舗装道路での砂利敷代替や埋立／埋戻材としての利用可能性があるとの意見が得られた。また、すでに利用実績のある用途に着目し、石炭灰の施工実績を蓄積することが必要との意見も得られた。

秋田県は、リサイクル材料の中でもフライアッシュの利用拡大に向けて、公共工事等での優先利用につながる基準・制度の整備に取り組んでいるが、適用エリアが県内で限定されていることから限定的な施工実績にとどまっている。

このような現状を受けて、国・行政の立場からは、国の公共工事等での指定品目への追加実現に向けて、現場での施工実績を増やすことにより、今後の港湾施設等での利用拡大を図ることにつながるとの見方があった。リサイクル材料の中でも、特に石炭灰は、品質のばらつきの問題や安定的供給の問題などが指摘されていることから、リサイクル材料活用関連有識者の立場からは、施工実績を増やすことに加えて、将来的な事業化を見据えたサプライチェーンの成立可能性を検討

することが重要であるとの意見もあった。また、洋上風力発電関連事業者、洋上風力発電施工者及び石炭灰利用事業者の立場からは、石炭灰の強度向上に向けた技術的な検討を行った上での現場施工も必要であり、検討結果を現行のマニュアルに盛り込む等のプロセスを踏むとともに、広く、国・行政等に周知することで、現行のガイドライン・基準等の条件の広がりを求める声が多かった。

5.3.2. 洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性

洋上風力発電設備における石炭灰の用途として、コンクリート混和材、洗堀防止材、ブロック材、裏込材、藻場礁等利用可能性を期待する意見が多く、国交省の定めた「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」や各種マニュアル等を参考に実証試験を通じたデータ取得を行うことが必要であるとの意見が共通に得られた。具体的には、腐食などへの耐久性、強度、安全性確保等の検証を行い、現行のガイドラインや各種マニュアルの基準に当てはまらない場合には、最適な基準値、配合比率等を数値化し、国・行政との協議を行うことにより、今後の適用可能性の確度を高めることにつながるとの見方が多かった。

また、どのような形式の洋上風力発電設備でも必要とされる洗堀防止材の代替可能性については、サイズ、厚み、骨材同士のかみ合わせ等、人工的に成型したものが、自然石としての特性を再現できるかどうかが未知数であることからも、海外先行事例を基に技術仕様を整理し、石炭灰利用事業者の試作による性能評価を行うことが必要であるとのリサイクル材料活用関連有識者の立場からの意見も得られた。さらに、洋上風力発電施工者の立場からは、石炭灰の「品質不安定性」、「比重小」、「安全性」の3課題をクリアすることが先決であるが、石炭灰による従来材料の全量置き換えではなく、一部置き換えによる施工実績を積み重ねることが、今後長期的に見た利用拡大可能性が高いとの意見が得られた。

なお、秋田県内の建設関連事業者や石炭灰利用事業者からは新たな事業拡大可能性に期待しつつも、材料費低減がトータルコストとしてのメリットになるかどうか疑問視する声もあった。石炭灰を利用する事業者の立場からは、従来の製造ラインが利用できず改良等が必要になった場合の、投資コストが回収できるかの懸念もあった。

5.3.3. 他の素材との組合せ等による利用拡大可能性

上述の通り、石炭灰を港湾施設や新たな適用先としての洋上風力発電設備等で利用する場合、比重の小さい特性を解決するための重量対策が求められることが多い。過去にスラグとの組合せによる利用実績はある。スラグは、品質管理が確実に進められており、安定供給も行えることが、活用例の多さにつながっている。

今後、石炭灰とスラグ(鉄鋼スラグ、IGCC 溶融スラグ、銅スラグ等)との混合によるテスト施工を行い、技術的特性を整理することが必要であるとともに、複数のリサイクル材料を使うことによる調達コストを含め、トータルコスト試算を行うことが必要であるとの意見があつた。

くわえて、前項に挙げた、石炭灰による従来材料の「一部置換」も、他の素材との組合せの選択

肢のひとつとして考慮し、弾力的に検討・運用していくことが導入拡大の途を広げることにつながると考えられる。

5.4. 新たな視点としての“カーボンリサイクル”の観点から見た石炭灰利用可能性

5.4.1. カーボンリサイクルの定義

世界規模で、「脱炭素」に向けた取組が強化され、我が国においても、第 5 次エネルギー基本計画において、2050 年に向け、温室効果ガス 80% 削減を目指し、エネルギー転換・脱炭素化への挑戦に取り組むことが明記されている。一方、生命、健康、教育に直結し基本的人権を支えるといえるエネルギー需要は、途上国の都市部で特に強く、エネルギーセキュリティ、さらには途上国の貧困問題やエネルギーアクセス不足を踏まえれば、再生可能エネルギーの導入のみでの対応は現実には難しく、大規模安定電源が不可欠である。地球規模の課題は、エネルギーアクセス改善と気候変動問題の 2 つの課題を同時解決することを求めており、日本が果たす役割は大きいと考えられる。

“カーボンリサイクル”的動きは、2019 年 1 月のダボス会議での安倍総理のスピーチから始まった。安倍総理は、“二酸化炭素というのは、一番優れた、しかも最も手に入りやすい、多くの用途に適した資源”と、人工光合成やメタネーションを例に挙げながら紹介し、“今こそ、CCU を、その活用を、考えるとき”と言及した。これを受け、2019 年 2 月から、国のカーボンリサイクル政策が大きく動いており、2 月に経済産業省にカーボンリサイクル室が設置され、6 月にはカーボンリサイクル技術ロードマップが策定され、G20 の共同声明には、“カーボンリサイクル”が明記された。また、9 月には第 1 回カーボンリサイクル産学官国際会議が開催され、経済産業大臣がカーボンリサイクル 3C イニシアティブを発表するなど、日本の新たな令和元年はまさに、カーボンリサイクル元年とも言える。

経済産業省では、CO₂ 削減を行い、気候変動問題の解決を図る、として、“カーボンリサイクルは、CO₂ を炭素資源、カーボンとして捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用つまりサイクルする”と紹介している。また、CO₂ 削減に向けては、水素、CCUS、再エネ、省エネなど、様々な取組の選択肢があるが、これらの選択肢にどれか一つに取り組めばいいというものではなく、これら様々な技術を総動員し、イノベーションにつなげていくことが必要と考えている。この選択肢の一つが CCUS であり、経済産業省では、この CCUS の利用の中で、カーボンリサイクルを定義している。また、全世界に目を向けてみると、IEA でも、CO₂ 削減シナリオが示されており、そこでも CCUS 再エネ、省エネ等の取組と、2050 年に向けた目標数値が紹介されている。

このように、国内外で、CO₂ 削減に向けて必要な技術や取り組みが示される中で、経済産業省で取りまとめたカーボンリサイクル技術ロードマップでは、CO₂ を利用可能なエネルギー・製品等を整理している。また、このロードマップの中では、エネルギー・製品毎にコスト低減に向けた課題と目標が示されているが、多くのカーボンリサイクル技術は、化学反応プロセスで、水素が必要となり、水素製造のコスト削減が重要なポイントとなる。

しかし、現時点では、安価な水素の調達が難しいことからも、2030 年ころを目標とした場合、まず

は水素を使用しなくてもよい技術としてバイオジェット燃料等の液体燃料や、鉱物化反応を利用したコンクリート製品の製造などが期待されている。

- 大気中のCO₂削減を行い気候変動問題の解決を図る。同時に、新たな資源の安定的な確保につなげる。同時解決のイノベーションにチャレンジ。
- CO₂を炭素資源（カーボン）と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用（リサイクル）する。このため技術の研究開発を効率的に推進。
 - ① CO₂の回収コストの低減
 - ② CO₂を素材・資源に転換する技術の開発（化学品、燃料、鉱物等）
 - ③ 炭素由来の化学品・資源等の用途開発
 などに取り組み、新しいエコシステムを構築。

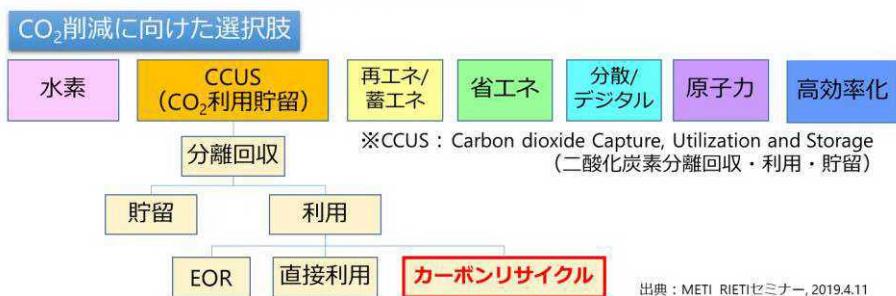
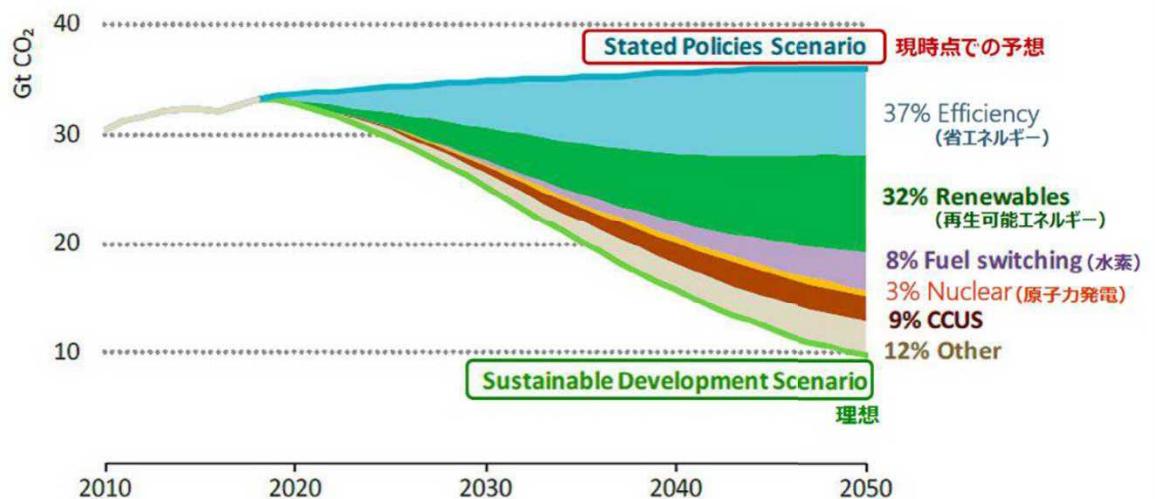


図 5-1 カーボンリサイクルの定義
(出典:(一社)カーボンリサイクルファンド HP)



「公表政策シナリオ（Stated Policies Scenario）」と「持続可能な開発シナリオ（Sustainable Development Scenario）」の間のギャップを埋めるために必要な取り組みとその貢献度
(出典) World Energy Outlook 2019

出典：METI資源エネルギー庁 Webサイト

図 5-2 IEA による CO₂削減シナリオ
(出典:(一社)カーボンリサイクルファンド HP)

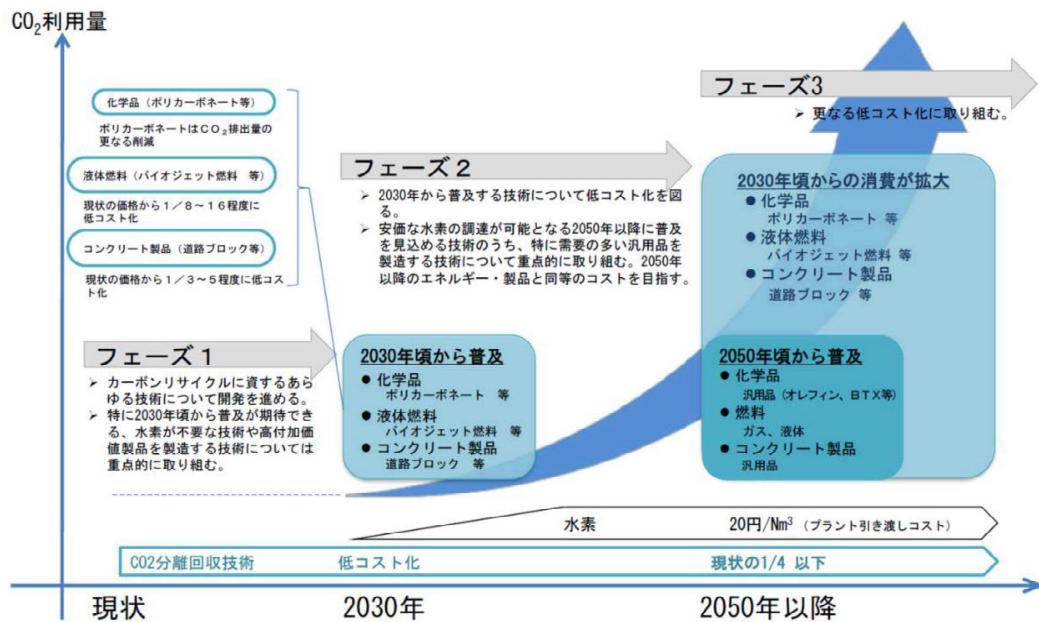
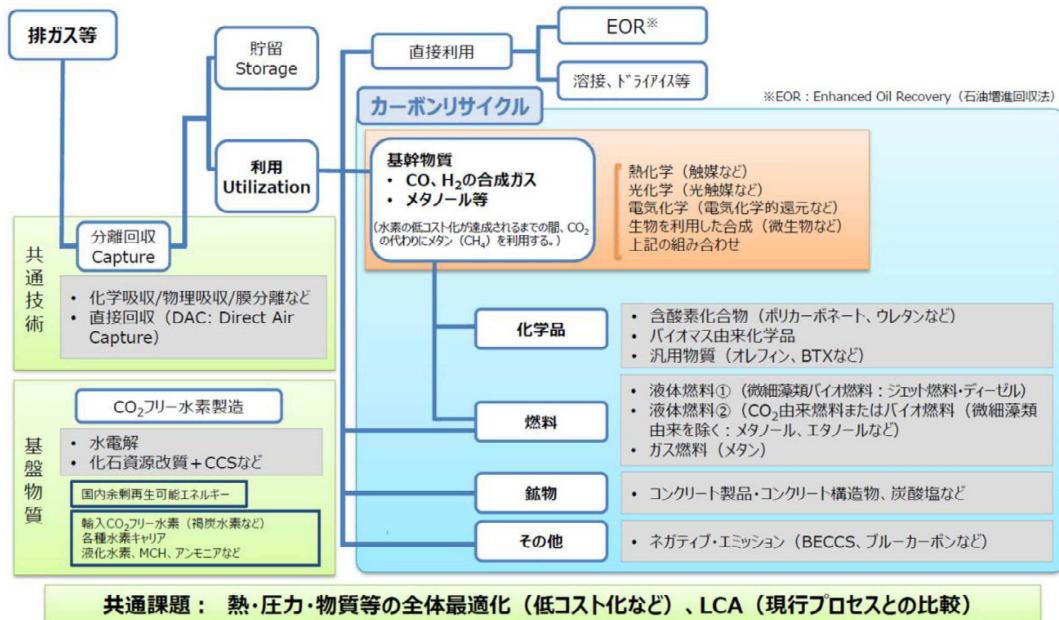


図 5-3 METI カーボンリサイクル技術ロードマップ

(出典: (一社)カーボンリサイクルファンド HP)

5.4.2. 具体的事例

石炭灰を用いた炭酸塩化の技術は、輸入国よりも産炭国、特に石炭灰中の Ca や Mg などの濃度が高い傾向がある低品位炭が産出される国において積極的な研究が行われているため、これら国々の取組を紹介する。

(1) CARBONCURE

1) 概要

CarbonCure 技術はカナダの CO₂ 利用技術カンパニーである CarbonCure Technologies Inc によって、北米約 100 ヶ所のセメント・コンクリートプラント(生コン工場)に設置された技術である。それらのコンクリートは、カリフォルニア高速鉄道や高層ビルから私道など数多くの利用実績がある。近年ではシンガポールのコンクリート企業である Pan-United Corporation Ltd と組んでアジアへの展開も行っており、Pan-United のコンクリート工場で年間 4,000 トン以上の CO₂ の削減があることを見積もっている。

CarbonCure 技術は、2007 年に CEO である Rob Niven によって開発されたもので、コンクリートによる CO₂ 排出削減技術である。2018 年、CarbonCure チームは、20 名のフルメンバーになり、Jennifer Wagner 副社長が XPRIZE チームのリーダーである。

CarbonCure 技術のプロセスでは、最初に液体 CO₂ を化学工場や石油プラントから購入し、それをセメントミキサーやミキサートラック内に設置されたノズルから適量吹き込む。CO₂ 吹き込み時、CO₂ が減圧されるため、ミキサー内にはドライアイスと CO₂ ガスの混合物として導入され、それがセメントと混合される。CO₂ とセメントの反応は瞬時に行われるため、従来の生コンクリートと同様の使い方やサプライチェーンの活用が可能となっている。また、スラグや石炭灰を混和材として用いた配合についても対応できている。

2) 技術

コンクリートには風化と早期炭酸塩化の 2 つの CO₂ による中性化がある。風化による中性化は、コンクリート固化後に大気中の二酸化炭素に曝されると長期間に渡って反応するものである。鉄筋補強材を使用したコンクリートでは、補強材の表面の保護不動態層の安定性を確保するために、高い pH が必要となる。風化により中性化が進むと、pH の低下により、不動態層が劣化し、それにより補強材が有害な腐食を受けやすくなる。

CarbonCure が採用している中性化は、もうひとつの早期炭酸塩化による中性化である。セメントの早期水和反応時に並行して CO₂ を導入することで早期の炭酸塩化が生じる。早期炭酸塩化は急速に発生し、コンクリートをより緻密でより強くできる可能性がある。反応の詳細は以下のとおりである。

コンクリートは結合材である C-S-H(珪酸カルシウム水和物)を形成することでコンクリートとしての特性を発揮する。C-S-H の生成過程は種々あるが、CarbonCure では、以下の式のように、ポルトランドセメントに含まれるケイ酸塩であるエーライト(C₃S)やビーライト(C₂S)と CO₂ を反応させることで、C-S-H の生成を狙っている。



これらの反応は自発的な発熱反応である。これらの反応は、コンクリートの初期の炭酸化反応において、図 5-4 に示す 9 つのステップで C-S-H の生成を行っている。

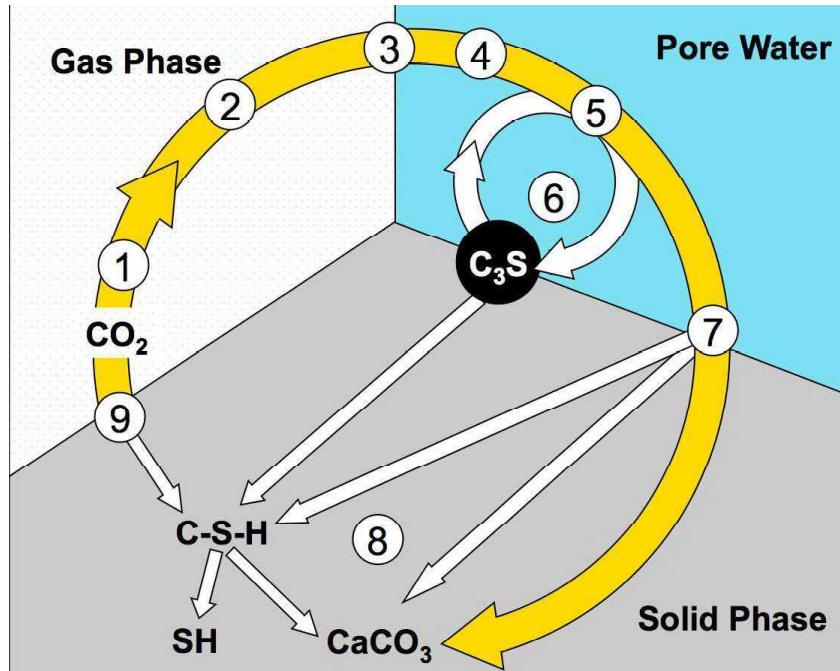


図 5-4 コンクリートの初期段階における C-S-H の生成過程

(出典:Monkman)

この各 9 ステップの詳細は次のとおりである。

- ① CO_2 が空气中を拡散してコンクリートに到達
- ② コンクリート中に CO_2 が拡散
- ③ CO_2 がコンクリート中の水分に溶解
- ④ 溶解した CO_2 が炭酸(H_2CO_3)を生成
- ⑤ 炭酸のイオン化(H^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} の生成)
- ⑥ ケイ酸塩である C_3S および C_2S の溶解(急速かつ周期的に、発熱を伴いながら反応が進行する。セメント粒子は、溶解して Ca^{2+} および SiO_4^{4-} イオンを放出する C-S-H の緩いゲル層に覆われる。)
- ⑦ 热力学的に安定な $CaCO_3$ の核形成と通常の C-S-H ゲルの形成
- ⑧ $CaCO_3$ が固相として沈殿(方解石形成の可能性)
- ⑨ CO_2 とセメントペーストの持続的な反応により、C-S-H ゲルと $CaCO_3$ を形成

早期炭酸塩化は風化と同様に CO_2 との反応があるため、しばしば pH の低下が懸念されてきたが、CarbonCure で独自に試験を行ったところ、図 5-5 に示すとおり pH の低下は確認されなかつたことを報告している。

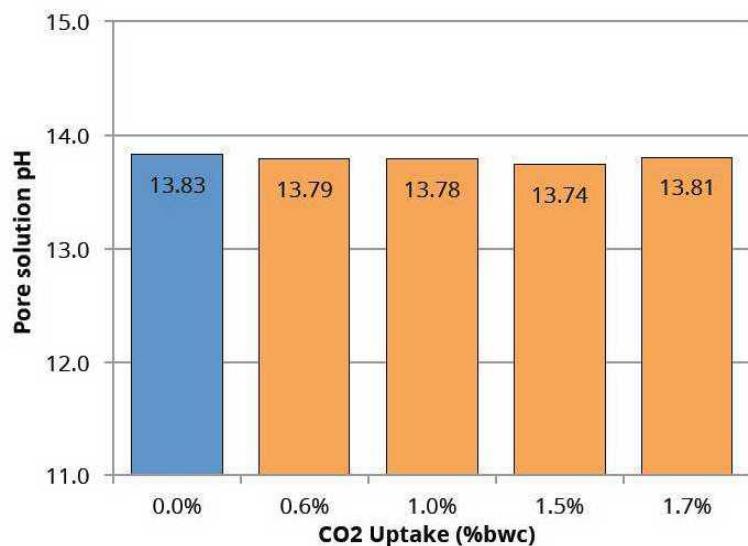
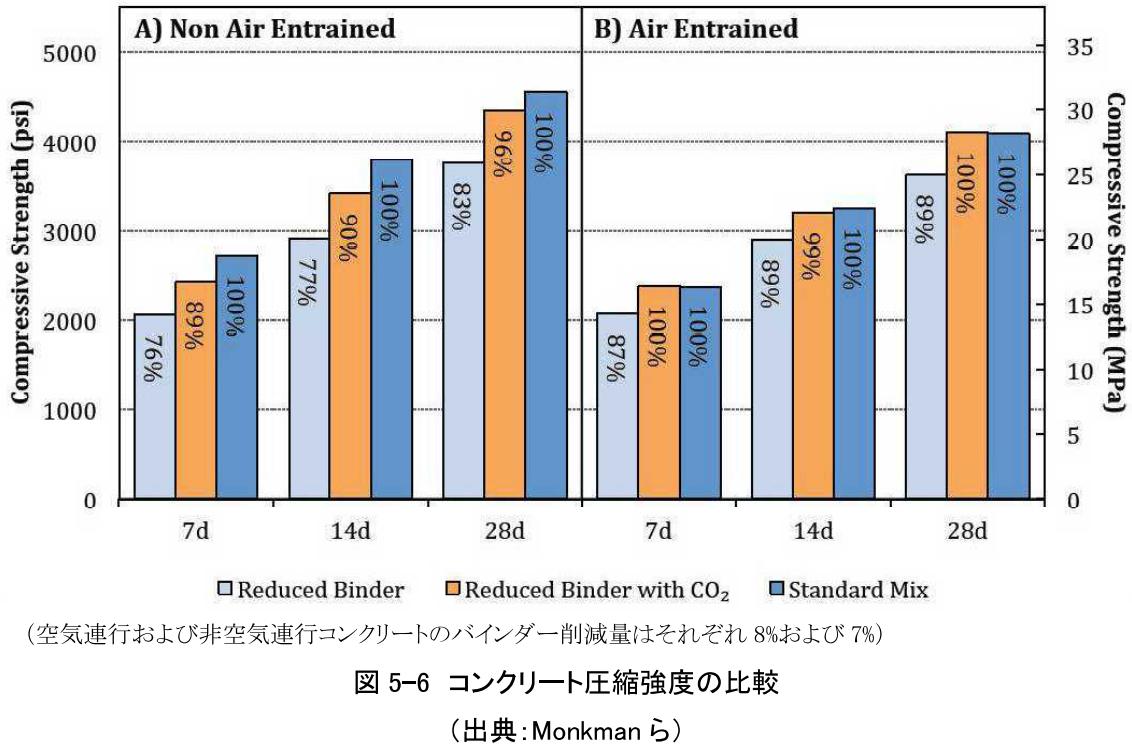


図 5-5 早期炭酸塩化における CO_2 添加量と細孔中 pH の関係

(出典: Monkman)

CarbonCure 技術では、 CO_2 による早期炭酸塩化により、強度の補強が行われるため、セメント等のバインダー使用量を減らしても強度を保持することができる。図 5-6 に空気連行(バインダー使用量 8%減)および非空気連行コンクリート(バインダー使用量 7%減)の強度比較を示す。



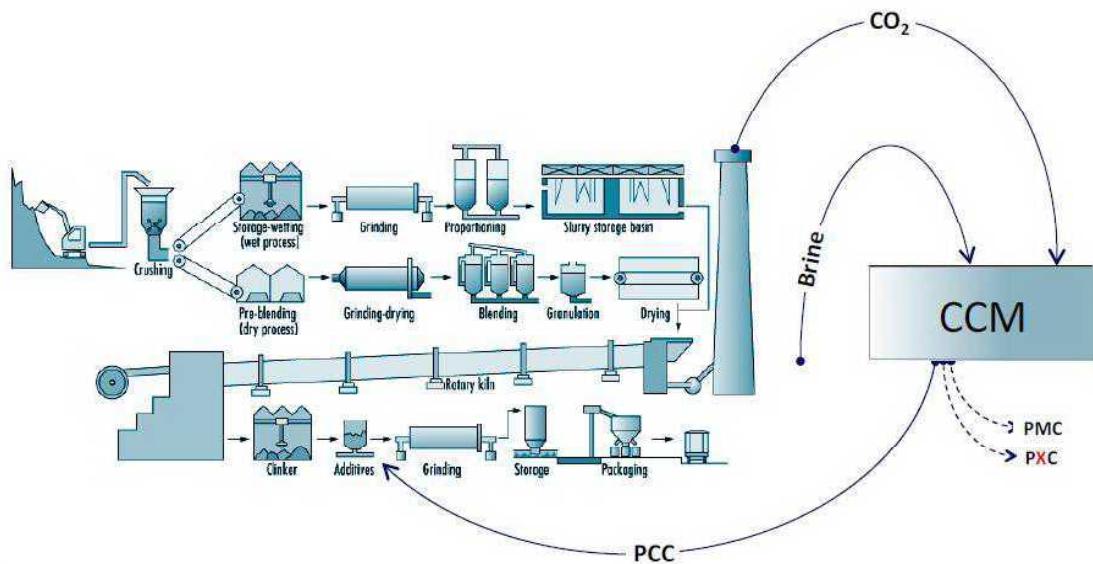
(2) Carbon Capture Machine

1) 概要

Carbon Capture Machine(CCM)は、Mohammed Salah-Eldin Imbabi 講師やセメント化学の Fred Glasser 名誉教授などスコットランドの Aberdeen 大学の関係者が中心となって開発した技術であり、現在は Carbon Capture Machine (UK) Incを設立して技術の普及を図っている。

CCM は、CO₂とマグネシウムやカルシウムを含んだ塩水とを反応させて炭酸カルシウム、炭酸マグネシウム及びその他の付加価値のある炭酸塩を生成するプロセスである。そのため、販売先としては、コンクリート企業、製紙会社、プラスチック会社、製薬会社、化粧品会社などが想定されている。これらの市場規模は 70 億ドルある他、断熱石膏ボードなどの建材分野では 240 億ドルの市場がある。

原料となる CO₂は純 CO₂である必要がなく、排ガス中の CO₂も利用することができる。例えばセメント会社へ適用する場合、セメントキルンから発生した排ガスを活用し、炭酸カルシウム(沈降性炭酸カルシウム混合物 Precipitated Calcium Carbonate Admixture:PCC)を製造し、それをセメントとして出荷するプロセスも想定している。図 5-7 にセメント会社における CCM の活用イメージを示す。



(注) Precipitate CaCO_3 (Precipitated Calcium Carbonate, PCC)

Precipitate $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Precipitated Magnesium Carbonate, PMC)

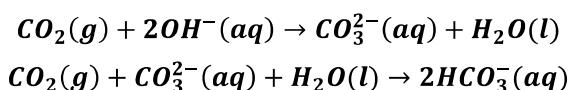
(Precipitated X Carbonate, PXC)

図 5-7 セメント会社における CCM の活用イメージ

(出典: McDonald ら)

2) 技術

Mohammed らはアメリカで CO_2 の貯留方法として CCM 技術に関する特許を取得しており、この中でプロセスと原理について述べている。まずは、煙突から発生した CO_2 とアルカリ溶液を充填カラムやプレートカラムを用いて反応させ、 CO_2 を捕集する。その際、溶液中では、次式に示す反応が起き、炭酸イオンが発生する。



この炭酸イオンを含んだ溶液の pH を高く保つことで、炭酸イオンは保持され、この溶液とマグネシウムやカルシウムを含んだ溶液と混合することで、炭酸イオンがマグネシウムやカルシウムと反応し、炭酸塩の固体物が沈殿し、製品となる。

一連の反応に必要なアルカリ溶液は水酸化ナトリウムとしており、その発生源としてセメントクリンカダストを想定している。これらは通常廃棄物として取り扱われるため、未利用資源の活用に繋がる。マグネシウムやカルシウムを含んだ溶液 (Brine) は濃度が濃い方が反応に富むため、地下の残留水や海水淡水化の過程で発生する塩分が濃縮された排水などを想定している。

(3) Carbon Upcycling UCLA

1) 概要

Carbon Upcycling UCLA とは、カリフォルニア大学ロサンゼルス校の Gaurav Sant 准教授が開発した CO₂ を吸収することで固化する新しいコンクリート CO₂CONCRETE™を用いて火力発電所からの CO₂ 排出を削減する技術開発チームのことである。図 5-8 に火力発電所における CO₂CONCRETE™の利用方法イメージを示す。現在は、Gaurav Sant 准教授が CEO として立ち上げた CO₂CONCRETE, LLC の中にこのチームが所属しており、Xprize 社での対応やその他技術開発を進め、ライセンス契約によるビジネスを計画している。



図 5-8 火力発電所における CO₂CONCRETE™の活用イメージ
(出典:CO₂ Concrete ホームページ)

CO₂CONCRETE™ は、(1) 固体からカルシウムをポートランダイト Ca(OH)₂として抽出、(2) ポートランダイトを含むセメントストラリの形成、(3) セメントストラリを構造部品に成形、(4) 構造部品を火力発電所の煙突から供給される CO₂に曝し、それによりコンクリート製品を形成という 4 過程を経ることで得られる新しいコンクリート製品である。通常のコンクリートはセメント製造の過程で多量の CO₂ が発生するが、本技術は、セメントを用いず、固化過程で CO₂ を吸収するため、コンクリートによる CO₂ 排出を従来品に比べて半分以下にできる建設材料を提供するものである。その他、大きな特徴として、コンクリートセメントストラリを 3D プリンタの様に自由に成型した状態で固化できる点も挙げられる。

2) 技術

CO₂CONCRETE™ の製造技術の詳細は、Sant らの特許にまとめられている(出典:Sant ら)。本技術に必要な材料は、カルシウムまたはマグネシウムの供給源(カルシウムリッチなフライアッシュ、鉄鋼スラグ、既成灰など)、その供給源からカルシウムイオンやマグネシウムイオンを取り出す脱イオン溶液(純水や脱イオン剤を含む溶液など)、ストラリを形成するための不溶固体物(フライアッシュなど)、CO₂ を含む排ガス、熱である。

製造過程は次の 4 つのプロセスがある。

- ① カルシウムまたはマグネシウムの供給源から脱イオン溶液を用いてカルシウムイオンやマグネシウムイオンをポートランダイト $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ として抽出
- ② 抽出液と不溶固形物を混合し、スラリを製造
- ③ スラリを任意の形状に成型
- ④ 成型物に 45~75°C の熱を加えつつ、 CO_2 を含む雰囲気に保持し、スラリと CO_2 を反応させることで固化

①と②のプロセスは分ける必要がなく、例えばカルシウムリッチなフライアッシュを用いれば、純水と混ぜるだけでスラリの製造が可能である。特許では、カルシウムが 26wt%を超えるカルシウムリッチなフライアッシュを用いた場合、フライアッシュの重量に対して 0.2%の純水を混合することで、固化時に十分な強度とコンクリート組織を形成することを報告されている。図 5-9 と図 5-10 にカルシウムリッチなフライアッシュを用いた場合のコンクリート組織と強度をそれぞれ示す。

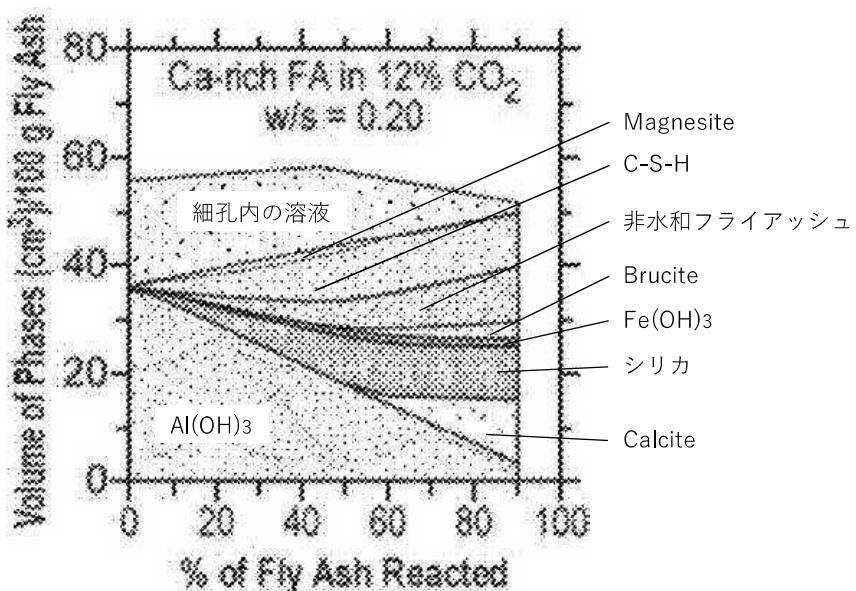


図 5-9 カルシウムリッチなフライアッシュを用いた場合のコンクリート組織
(出典:Sant ら)

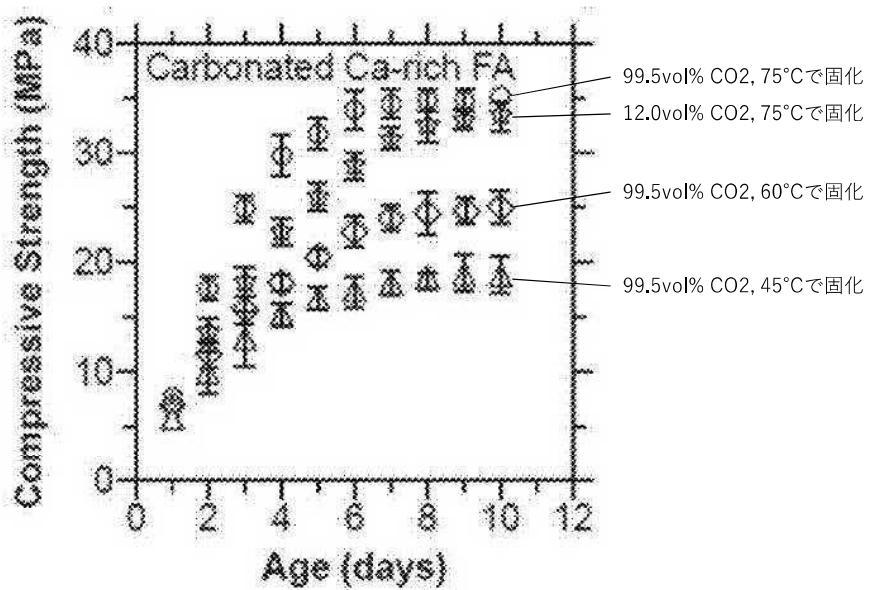


図 5-10 カルシウムリッチなフライアッシュを用いた場合のコンクリート強度
(出典:Sant ら)

5.5. 総括

前年度委託及び今年度調査での結果を総合的に考察し、以下のように取りまとめた。

5.5.1. SDGs 達成に向けた用途別特性を生かした石炭灰利用促進のポイント

前年度委託により絞り込んだ各用途に関して、今年度調査結果を踏まえ、以下の通り考察した。

(1) 混和材

港湾施設等では、フライアッシュが、JIS 灰であるか否かによって適用に求められる技術仕様は異なってくるが、利用実績もあり、利用による不具合等の課題は指摘されていない。

今後、さらに適用事例を増やし、各事例で技術仕様を満たすことを定量的に確認することで、新たな適用先としての洋上風力発電設備におけるコンクリート混和材での適用可能性が高まると考えられる。

(2) 捨石

港湾施設等では、石炭灰の捨石での利用実績はない。捨石として利用する場合には、波力影響への安定性等長期的な耐久性が求められるとともに、溶出等環境面での配慮も必要である等、人工構造物が天然石と同等の性能を保有することが重要になってくる。

他のリサイクル材料として、建設発生土、鉄鋼スラグ二次製品、エコスラグでの港湾施設での利用実績はあるものの、長期的な利用に至っていないことからも、今後、天然石の性状等を把握した上で、産業副産物による人工石化製造技術の確立が必要である。製造技術の確立により、新たな適用先としての洋上風力発電設備における捨石の技術仕様を満たすかどうかを検証すべく、実海域での実証試験を行い、捨石としての適用可能性を再度検討することが必要であると考えられる。

(3) 中詰材

港湾施設等では、フライアッシュ(非 JIS 灰)を用いた河川築堤基礎の止水壁、道路盛土基礎の杭、防波堤ケーソン中詰などでの利用実績があるとともに研究成果を基にした実用化に結びついているが、非 JIS 灰使用のため品質変動を考慮した配合設計が重要となっている。

今後、さらに適用事例を増やし、各事例で技術仕様を満たす最適な配合設計を実現することで、新たな適用先としての洋上風力発電設備における中詰材での適用可能性が高まると考えられる。

(4) 被覆石、根固・消波ブロック

港湾施設等では、フライアッシュ(非 JIS 灰)及び石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)を用いたブロック材の利用実績があり、特に石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)については、性能面からも標準材料に準ずる性能との評価が得られている。ブロック材としての利用するためには、実海域に適した重量が主要な要求事項となってることから、比重の小さいフライアッシュを単体で利用する場合には問題となってくる。

一部事例で、他の副産物としてのスラグ系材料との組合せにより重量アップに結びつけているこ

とからも、最適な配合設計、製造法の確立を行うとともに、製造後のブロック材の実海域での性能評価を行うことが必要である。また、他の副産物の輸送コスト等も含めたトータルコストの試算を行い事業成立性も検討することで、新たな適用先としての洋上風力発電設備におけるブロック材での適用可能性が高まると考えられる。

(5) 裏込材・裏埋材

港湾施設等では、形態の異なる石炭灰毎に、利用マニュアル等が整備され、石炭灰の軽量という特性をメリットとして生かせることからも、利用実績もあるものの、長期的な利用に至っていない。

重量面からは、用途に最適な重量となるよう調整が必要であり、石炭灰の性状のばらつきを前提とした上で、各事例で技術仕様を満たす最適な配合設計を実現することで、新たな適用先としての洋上風力発電設備における裏込材・裏埋材での適用可能性が高まると考えられる。

(6) 藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等

港湾施設等では、ブロック材同様に、利用実績があり、藻場等としての機能に加え、水質・底質環境改善等付加価値も挙げられている。藻場等としての適用可能性を検証するためには、長期間での経過観察(モニタリング)が必要であることからも、実海域における長期検証が必要である。

一方、漁港における実証試験が各地で行われていることからも、今後、港湾施設での適用事例を増やし、各事例で技術仕様を満たす最適な配合設計を実現することで、新たな適用先としての洋上風力発電設備における藻場等での適用可能性が高まると考えられる。

5.5.2. 洋上風力発電設備における石炭灰利用促進に向けたポイント

洋上風力発電導入における石炭灰利用可能性について、4.2.2においてもふれた「風力発電システムの導入促進に関する提言」(一般財団法人新エネルギー財団、2018年)が言及している現状の主要な課題と関連させて考察した。

まず、系統制約解消の側面からは、海底ケーブルの設置や増強が不可欠であることから、ケーブルの陸揚げ地点の保護・補強や関連設備の設置に関し、リサイクル材料が活用できる余地があると考えられる。また、導入促進に関しては、作業船群の確保と関連して拠点港の整備が必須となり、港湾施設はもとより港湾周辺の道路整備など、広範な対象についてリサイクル材料使用の可能性が高められる可能性があると考えられる。さらに、一般海域占用に関して、再エネ海域利用法が成立し、秋田県沿岸を含む全国4か所が促進海域のうち特に有望な区域であると位置づけられ、現在、地元漁協等との建設計画推進に向けた具体的な協議会による検討や事業者選定が進められている。特に、事業者選定时の評価基準には地元連携の視点が盛り込まれており、地元で発生したリサイクル材料の活用は選定の大きなアドバンテージとなりうると考えられ、地元の産業副産物の地元での利活用は、コスト削減が期待できるとともに、地産地消を通じた雇用促進等の効果も期待される。

一方、海外に目を向けると、洋上風力発電導入が先行して進められている欧州等では基礎部分

以外のタワー部分等へもコンクリートを適用した例が出現しつつある。ドイツではハブ高さ 140m という大型のタワーに用いられた例があり、また、大西洋カナリア諸島(スペイン)ではコンクリートでタワーと基礎の両者を製作した洋上風力発電の実証実験がすすめられている。わが国でも NEDO 事業として低コスト化を目的とした要素技術実証等により「浮体・タワー・係留システム」全体の軽量化をめざす一環としてコンクリート浮体の検討が行われている。また、技術の観点からのみならず、環境整備の観点からは、特に、デンマーク、オランダ等における港湾周辺地域における実証サイト建設等を通じた産学官連携研究開発拠点形成等による地元活性化に結びつける取り組みは参考となり、拠点活用により実証試験等を推進し、定量データを集積していくことが重要である。

遠浅の海岸が少ないわが国においては、着床式の風力発電設備が導入可能な海域が限定されるうえ、基礎部分には重量が求められるため、リサイクル材料として石炭灰が選択されるには種々の観点でのハードルの存在が否定できないものの、基礎部分での適用以外の付属施設での利用や、漁業共生の観点からの藻場利用等による漁業振興等、我が国の特性をとらえた波及効果も期待されると考えられる。また、我が国で導入予定の洋上風力発電形式は着床式であるものの、世界の情勢に合わせ、今後浮体式へのシフト可能性も高いことから、本調査事業での成果を活用いただきたい。

5.5.3. 今後の展望

今後、洋上風力発電設備での石炭灰利用を実現するために必要な事項として下記提案によりまとめる。

(1) 普及啓発

- 排出者(電力会社、石炭火力発電所等)に対する石炭灰処理問題の浸透・高揚
- 石炭灰リサイクル推進の徹底(秋田県については概ね徹底されている)
- 石炭灰リサイクルに関する技術等に係る知識の普及・啓発

(2) 制度策定

- 石炭灰の利用目的別の品質基準及びガイドラインの作成
- 石炭灰利用推進及び手続きの簡素化による石炭灰リサイクルシステムの構築
- 石炭灰保管ヤード、リサイクル処理施設の整備を支援する公的助成制度の設置
- 石炭灰リサイクル処理技術の開発に対する支援

(3) 環境整備

- 石炭灰の効果検証のための産学官連携拠点整備
- 実海域での実証試験、モニタリング調査を通じた定量データの集積

上記、各項目の実施に向けた検討を着実に進めるとともに、洋上風力発電事業をめぐる状況の変化にも常に留意が必要である。

前年度委託の報告書において、今後の石炭灰活用促進に向けたポイントとして
「新たな用途での適用を推進するための正の流れを創り出すこと」
「洋上風力発電事業の現場を広く捉えること」
「技術的側面と政策的側面のバランスをとつてすすめること」
の3点を挙げた。

今年度、わが国での再エネ海域利用法の成立及び有望区域として秋田県から2か所が選定されたことは、秋田県にとって上記3点に留意して活用促進を加速する機会が訪れつつあると判断できる。

地元算出のリサイクル材料である石炭灰を活用し、地元と連携・協議しつつ理解を深めながら、新たな適用先としての洋上風力発電設備で利用促進を図ることは、同法の趣旨にも叶っていると考えられ、発電施設のみならず周辺港湾や交通アクセスの整備など、現場を広く捉えて実証を重ねて、実績と理解を得ることを継続していくことが望ましい。

一方で、浮体式への移行や風車タワー部分への活用可能性の検討など、将来を見据えた取り組みも並行して着手すべきと考える。

このことは、「現場を広く捉える」観点であるとともに、風車設計側の技術的基盤が必ずしも固まつていない早い段階から関与することにより、石炭灰関係者側の技術面に偏重することなく、活用の「正の流れ」に組み込める可能性が高まると判断される。

6. 参考文献リスト

本調査事業を進めるにあたって以下を参考文献として活用した。

参考箇所	発行元	タイトル／HP	発行年など
2章	経済産業省資源エネルギー庁 国土交通省港湾局	再エネ海域利用法の運用開始に向けた論点整理－促進区域指定と事業者選定について－	2018年12月
	経済産業省資源エネルギー庁 国土交通省港湾局	海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律	2018年11月
	内閣府	海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るために基本的な方針	2019年5月
	秋田県	秋田県能代市、三種町および男鹿市沖における協議会配布資料	2019年10月、12月
	環境省	循環型社会を形成するための法体系	2013年
	(社)土木学会 エネルギー土木委員会	石炭灰有効利用技術について	2003年
	通商産業省	電気業に属する事業を行う者の石炭灰の利用の促進に関する判断の基準となるべき事項を定める省令	1991年
	国土交通省	今後の港湾環境政策の基本的な方向	2005年
	(一社)海洋産業研究会	洋上風力発電等の漁業協調の在り方に關する提言(第2版)	2015年
	NPO 法人国際環境経済研究所 HP	ブルーカーボンとは (http://ieei.or.jp/2019/05/special201608027/)	2019年
3章	国土交通省	港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン	2018年
	公益社団法人土木学会	循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術－利用拡大に向けた設計施工指針試案－	2009年
	農林水産省農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター	水産基盤整備事業におけるリサイクル材の活用に関する現状と展望	2008年
	一般社団法人水産土木建設技術センター	水産基盤整備事業における廃棄物等の再利用技術手法の検討	2002年
4章	4C offshore HP	https://www.4coffshore.com/windfarms/japan/	-
	日経産業新聞	(環境・エネルギー・素材)洋上風力、秋田で計画続々	2019年7月18日
	自然エネルギー財団	“浮体式の洋上風力発電で日本初の商用運転－長崎県・五島市で漁業との共生を目指す－”, 自然エネルギー活用レポート	2017年
	佐藤郁、小林修、宇都宮智昭、白石崇	環境省浮体式洋上風力発電実証事業－実証機の施工および現地設置について	風力エネルギー利用シンポジウム予稿集、36、pp.217-220、2014
	新エネルギー財団	風力発電システムの導入促進に関する提言	2018年3月
	IEA	Energy Outlook	2019年
	WindEurope	Wind energy in Europe in 2018 -Trends and statistics	2019年2月
	WindEurope	Wind Energy in Europe: Outlook to 2023	2019年10月
	EWEA	Prioritising Wind Energy Research Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector	2005年
	W. Musial, S. Butterfield, B. Ram	Energy from Offshore Wind	Conference paper, Offshore Technology Conference, 2006
	長井浩、池ヶ谷辰哉、伊藤正治、中尾徹	わが国沿岸海域における洋上風力発電の期待可採量	風力エネルギー、34、pp.103-112、2010.
	Wind Energy The Fact	http://www.wind-energy-the-facts.org/downloads.html	-

	ETIP Wind	ETIP Wind Roadmap	2019年11月
	Clara Matutano、Vicente Negro、Jose-Santos López-Gutiérrez、M. Dolores Esteban	Scour prediction and scour protections in offshore wind farms	Renewable Energy, 57、pp.358-365、2013
	Anders Wedel Nielsen、B. Mutlu Sumer、Thor U. Petersen	Sinking of Scour Protections at Horns Rev 1 Offshore Wind Farm	Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering sediment 67、2014
	一般社団法人海洋産業研究会	洋上ウインドファームおよび周辺産業に関する欧州視察団	2019年8月29日
	CONSTRUCTION INOUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION	Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering	CUR REPORT 、154、1991
	Sean Monkman	TECHNICAL NOTE - Types of Concrete Carbonation	Carbon Cure ホームページの報告書
	Sean Monkman 、 Mark MacDonald	CO ₂ Utilization in Concrete Mix Design Optimization	Carbon Cure ホームページの報告書
	Lewis McDonald 、 Fredrik P. Glasser, Mohammed S. Imbabi	A New, Carbon-Negative Precipitated Calcium Carbonate Admixture (PCC-A) for Low Carbon Portland Cements	Materials (Basel) 、12(4)、554、2019
	CO ₂ Concrete ホームページ	https://www.co2concrete.com/carbon-capture-process/	-
	Gaurav Sant, Laurent G. Pilon, Bu Wang 、 Narayanan Neithalath 、 Zhenhua Wei 、 Benjamin Young 、 Gabriel D. Falzone	Efficient Integration of Manufacturing of Upcycled Concrete Product into Power Plants	US 2019 / 0177220 A1, June 13, 2019
5章	一般財団法人石炭エネルギーセンター	石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(総合改訂版)	平成30年
	一般社団法人セメント協会	セメントの LCI データの概要	平成30年
	西山貴大、酒井洋一	LCA 手法を用いたグリーン調達による環境負荷低減効果試算	沿岸技術研究センター論文集、7、pp.47-50、2007
	吉田泰、山本佳城、陣内浩、並木哲	環境配慮型超高強度コンクリートに関する研究	大成建設株式会社技術センター報、43、pp. 18-1-18-5、2010
	公益社団法人土木学会	コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題	平成21年
その他	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構	NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版 再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋	平成26年
	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構	着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版)	平成30年
	秋田県産業労働部資源エネルギー産業課	石炭灰有効利用可能性調査 報告書	平成26年、27年
	佐賀県海洋エネルギー産業クラスター研究会、佐賀県、アカシア・リニューアブルズ株式会社、オリックス株式会社、佐賀大学	佐賀県海洋エネルギー産業クラスター研究会(J☆SCRUM)第5回会議資料	平成30年
	一般社団法人日本風力発電協会	洋上風力発電の現状と今後の展望	平成26年
	国立研究開発法人水産総合研究センター	洋上風力発電施設の漁業協調型活用方策の提案	不明
	生物研究社	洋上風力発電と環境影響調査	海洋と生物 232、39、pp.421-471、2017
	資源エネルギー庁	一般海域における利用調整に関するガイド【初版】	平成29年
	資源エネルギー庁	再生可能エネルギー政策の最新動向と風力発電の現状	平成28年
	イー・アンド・イーソリューションズ株式会社、芙蓉海洋開発株式会社	NEDO 新エネルギー成果報告会 洋上風力発電等技術研究開発(洋上風況観測システム実証研究)「環境影響評価手法の確立」平成26年成果報告	平成26年
	イー・アンド・イーソリューションズ株式会社、芙蓉海洋開発株式会社	風力等自然エネルギー技術研究開発洋上風力発電等技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 浮体式洋上風力発電に係る基礎調査 成果報告	平成24年

	一般財団法人新エネルギー財団	風力発電システムの導入促進に関する提言	平成 30 年
	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(委託先)名古屋大学、株式会社三井物産戦略研究所、一般財団法人日本気象協会	平成 25~26 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 地域共生型洋上ウインドファーム基礎調査	平成 27 年
環境省		洋上風力発電所に係る環境影響評価の基本的な考え方の検討	記載なし
水産庁		漁場整備の現状と課題	平成 21 年
資源エネルギー庁		再生可能エネルギー政策の最新動向と風力発電の現状	平成 28 年
東北発電工業株式会社、日本大学、一般財団法人石炭エネルギーセンター、秋田大学、一般財団法人電力中央研究所		石炭灰の有効利用に関するセミナー資料	平成 29 年、30 年
長崎県産業労働部		第 6 回長崎県海洋産業フォーラム資料	2020 年 2 月

洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関する調査

令和元年度

一般財団法人石炭エネルギーセンター

〒105-0003 東京都港区西新橋 3-2-1

Daiwa 西新橋ビル 3 階

TEL:03-6402-6101(事業部直通) FAX:03-6402-6110

URL: <http://www.jcoal.or.jp/>