

秋田県委託調査

洋上風力発電設備への  
石炭灰利用促進に関する調査業務

報告書

令和元年度

一般財団法人石炭エネルギーセンター



<目次>

1.	調査概要	1
1.1.	目的	1
1.2.	事業概要	1
1.3.	実施体制	2
1.4.	実施期間	2
1.5.	実施内容	2
1.6.	実施結果（概要）	3
1.7.	今後の展望（概要）	4
2.	本調査事業の意義	6
2.1.	SDGs 達成に向けた本調査事業の位置づけ	6
2.2.	SDGs 「7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに」達成に向けた位置づけ	6
2.3.	SDGs 「12 つくる責任つかう責任」達成に向けた位置づけ	11
2.4.	SDGs 「14 海の豊かさを守ろう」達成に向けた位置づけ	17
3.	石炭灰の特性を生かした用途把握のための調査	22
3.1.	港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等の把握	22
3.1.1.	全国の港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等実態調査	22
3.1.2.	全国の港湾施設等における石炭灰の利用状況等実態調査	31
3.2.	洋上風力発電設備でのリサイクル材料利活用状況・可能性把握調査	38
3.2.1.	国・行政関係者に対するヒアリング調査	38
3.2.2.	リサイクル材料活用関連有識者に対するヒアリング調査	40
3.2.3.	洋上風力発電関連事業者に対するヒアリング調査	42
3.2.4.	洋上風力発電施工者に対するヒアリング調査	44
3.2.5.	秋田県内建設関連事業者に対するヒアリング調査	48
3.2.6.	秋田県内石炭灰利用事業者に対するヒアリング調査	49
3.3.	代替材料としての石炭灰利用可能性評価	50
3.3.1.	国・行政関係者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	51
3.3.2.	リサイクル材料活用関連有識者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	52
3.3.3.	洋上風力発電関連事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	53
3.3.4.	洋上風力発電施工者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	55
3.3.5.	秋田県内建設関連事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	57
3.3.6.	秋田県内石炭灰利用事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価	58
4.	国内及び海外における洋上風力発電計画の実態調査	60
4.1.	秋田県における漁業共生に関する取り組み調査	60
4.2.	県外における洋上風力発電設備に関する実態調査	65

4.2.1.	県外の洋上風力発電プロジェクト実態調査 .....	65
4.2.2.	日本における洋上風力発電導入の課題 .....	71
4.3.	ヨーロッパにおける洋上風力発電設備に関する実態調査 .....	72
4.3.1.	EU のエネルギー事情 .....	72
4.3.2.	EU の風力発電事情 .....	82
4.3.3.	EU における洋上風力発電プロジェクト事例 .....	104
4.3.4.	EU における洋上風力発電の課題 .....	120
4.4.	洋上風力発電の課題解決に向けたリサイクル材料活用の可能性 .....	121
5.	総合検討 .....	123
5.1.	市場構造から見た石炭灰利用可能性 .....	123
5.2.	過去の施工事例から見た石炭灰利用可能性 .....	124
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 .....	125
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 .....	125
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 .....	126
5.3.3.	他の素材との組合せ等による利用拡大可能性 .....	126
5.4.	新たな視点としての“カーボンリサイクル”的観点から見た石炭灰利用可能性 .....	127
5.4.1.	カーボンリサイクルの定義 .....	127
5.4.2.	具体的な事例 .....	130
5.5.	総括 .....	138
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 .....	138
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 .....	139
5.5.3.	今後の展望 .....	140
6.	参考文献リスト .....	142

## 1. 調査概要

### 1.1. 目的

石炭灰活用分野を拡張するため、今後発展が期待される洋上風力発電事業分野における発電事業の実態把握及び石炭灰活用の見込み等について調査、検討を行うことを目的とする。

### 1.2. 事業概要

「洋上風力発電設備への石炭灰利用に関する適用可能性調査業務委託」(平成 30 年度秋田県実施。以下、「前年度委託」という。)で、用途として有望とされた、基礎工における捨石や本体工における中詰材、被覆・根固工、消波工におけるブロック材等について、安全面、コスト面等について調査・検討する。

#### (1) 石炭灰の特性を生かした用途把握のための調査

国内の洋上風力発電事業に関与するマリンコントラクター、ゼネラルコントラクター及び商社へのアンケート及びヒアリング調査等により、石炭灰の特性を生かした用途を把握する。

- ① 代替材料としての石炭灰利用の可能性を評価する。
- ② 石炭灰を活用する際の技術的、社会的な課題とその対策について調査し、国、自治体等が行うべき施策を提案する。
- ③ 洋上風力発電施設におけるリサイクル材料使用状況や使用の可能性の把握
- ④ 港湾施設等における石炭灰の利用状況等の把握
- ⑤ 他の素材との混合等による利用方法拡大にかかる検討

同調査は、各種文献調査による情報収集・整理を行うとともに、外部有識者候補へのヒアリングを行う。

①及び②に関して、以下の観点を取り入れまとめる。

- ・洋上風力発電設備における石炭灰利用可能な具体的な用途
- ・石炭灰活用促進に向けた各種課題の抽出及び課題解決に向けた具体的な方策
- ・国・県等が行うべき普及啓発活動(案)、制度改善(案)等に向けた必要施策

③に関しては、現在稼働中あるいは建設計画中の地域のうち、主要地域における自治体の関係部局に対するヒアリング等を行う。

④に関しては、以下の観点を取り入れまとめる。

- ・適用用途での目的・実施内容
- ・適用時の仕様等詳細
- ・適用にあたって参照したガイドライン
- ・適用結果及び残された課題

①～④の調査結果を元に、石炭灰の「軽い」特性を生かした用途を見出すための検討、「軽い」弱点を克服するための検討を行い、後者の検討にあたって、⑤を進める。

## (2) 有望用途についての市場性、安全性、付加価値向上等にかかる調査

前年度委託により有望とされた捨石や中詰材、ブロック材等での利用について、市場性、安全性、付加価値向上等について調査、検討する。

検討にあたっては、一般財団法人石炭エネルギーセンターが秋田県内で実施している石炭灰ブロックによる人工藻場実証試験のモニタリング結果も検討材料とする。

- ① 原料となる石炭灰の発生量の推移や、秋田県周辺における洋上風力事業の動向等を調査し、現在の需給バランスや今後の予測需給について試算し、市場性について検討する。
- ② 捨石や中詰材、ブロック材等に係る安全性についての法規・条例の基準、民間規格や慣行、社内規定等(以下「基準類」という。)の情報を収集し整理し、これらの基準類による石炭灰利用品の評価を行うとともに、当該基準類適用の妥当性について考察する。
- ③ 塩害、ひび割れ等の対策について調査し、耐久性や強度、比重等の性質向上について検討する。また、他の素材との混合等による高付加価値化について考察を加える。
- ④ 製造原価や輸送等に係るコスト、耐用性、施工費用、ランニングコスト等総合的な観点から経済性について調査し、コンクリートや砂利等一般的な建設資材と比較した考察を加える。

同調査は、(1)の調査結果を元に、外部有識者候補への追加ヒアリング等を行い進める。

## (3) 県外における計画の実態調査

県外の主要な洋上風力発電設備計画におけるリサイクル素材活用に関する状況調査を行う。

## (4) 総合検討

(1)～(3)の結果を基に、石炭灰活用促進に向けた課題(技術面、規制面、その他)を抽出し、総合的な検討・考察を行い、報告書にまとめる。

### 1.3. 実施体制

実施機関:秋田県産業労働部資源エネルギー産業課

受託機関:JCOAL(一般財団法人石炭エネルギーセンター)

協力機関:一般財団法人日本気象協会

### 1.4. 実施期間

2019年5月14日～2020年3月19日

### 1.5. 実施内容

実施内容を、フローに示す(図 1-1)。

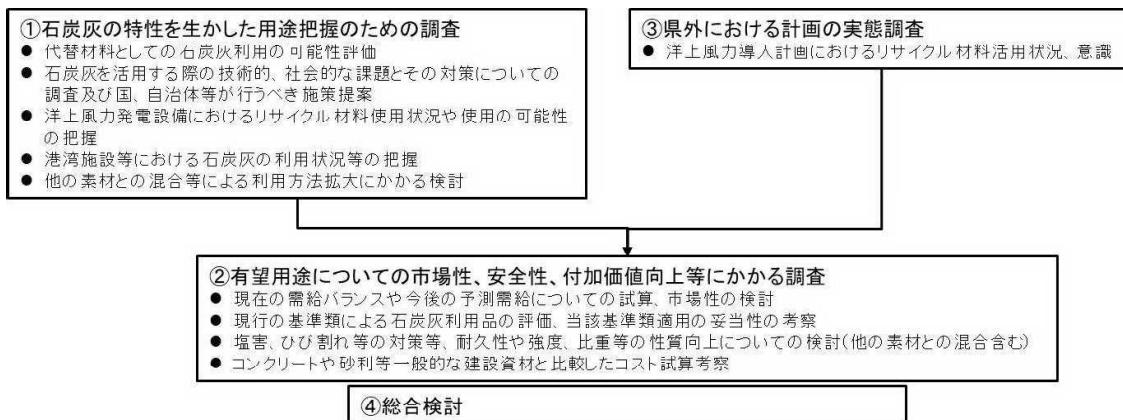


図 1-1 実施内容フロー

## 1.6. 実施結果(概要)

前年度委託により絞り込んだ各用途に関して、港湾施設等での利用実績を中心に、文献調査、ヒアリング調査等により深掘りし、今後の利用拡大に向けた考察を行った。

その結果、混和材、中詰材については、石炭灰を用いた具体的な事例での利用実績もあり、利用による不具合等の課題も指摘されていない。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適用可能性が高まると考えられる。捨石については、石炭灰を用いた具体的な事例での利用実績はない。建設発生土等、他のリサイクル材を用いた具体的な事例での利用実績はあるものの、長期的な利用に至っておらず、捨石としての利用には、天然石と同等の性能(安定性、安全性等)を保有させるための人工石化製造技術の確立が必要であると考えられる。被覆石等ブロック材及び裏込材等については、石炭灰を用いた具体的な事例での利用実績はあるものの、用途に適した重量が主要な要求事項となってくることから、比重の小さいフライアッシュ利用にあたっては、他の素材等との組合せによる重量アップ対策が必要であると考えられる。

また、洋上風力発電導入における石炭灰利用可能性について、文献調査、ヒアリング調査等により調査した結果、洋上風力発電導入における課題としても挙げられている系統制約解消の側面からもリサイクル材料の活用の余地はあると考えられる。また、前年度委託でも述べたように、洋上風力発電本体のみならず、抛店港の整備、港湾施設・港湾周辺の道路整備等広範な対象に対してリサイクル材料使用の可能性が高いと考えられる。特に、再エネ海域利用法の成立後、有望区域として選定された秋田県では今後事業者選定が行われる際に、地元の産業副産物の地元での利活用は、地産地消を通じた雇用促進等直接的に地元連携に結びつく可能性が高いことからも、今後の具体的な事業者選定時の評価基準や、事業者選定後の建設設計画時の工事仕様書等に地元で発生した石炭灰の利用が具体的に盛り込まれることが期待される。

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。

### 1.7. 今後の展望(概要)

今年度の調査結果やそこから得られた成果をふまえ、今後検討すべき内容を以下のとおり提案する。

#### (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

今後、秋田県内の洋上風力発電設備において石炭灰が広く活用されるためには、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っ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。



## 2. 本調査事業の意義

### 2.1. SDGs 達成に向けた本調査事業の位置づけ

2015年9月に、国連サミットで、普遍的かつ革新的なアジェンダを採択するとともに、貧困に終止符を打ち、不平等と闘い、気候変動に対処することをねらいとする17の「持続可能な開発目標(SDGs)」の達成が約束された。

SDGsは、私たちが共有する人道のビジョンであるとともに、世界のリーダーと人民との間の社会契約でもあるとされており、すべての国々とすべての人々に行動を求める普遍的な目標である。今後15年間で貧困に終止符を打ち、より持続可能な世界を構築するための行動に拍車をかけることをねらいとしているが、各国の国情、能力、開発水準の違いを考慮するとともに、国内の政策や優先課題も尊重することとしており、2016年1月1日にスタートし、2030年12月31日までに達成される予定である。

このSDGsでは、各国は、17の目標の達成に当事者意識をもって取り組むとともに、そのための国内枠組みを確立することが期待されている。

このような背景のもと、本調査事業では、17の目標のうち、特に、7番目の「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」、12番目の「つくる責任つかう責任」及び14番目の「海の豊かさを守ろう」の達成に向けて取り組んでいるものである。

### 2.2. SDGs「7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに」達成に向けた位置づけ

当該目標のうち、本調査事業は7.aに位置付けられるものである(図2-1)。



7.a 2030年までに、再生可能エネルギー、エネルギー効率及び先進的かつ環境負荷の低い化石燃料技術などのクリーンエネルギーの研究及び技術へのアクセスを促進するための国際協力を強化し、エネルギー関連インフラとクリーンエネルギー技術への投資を促進する。

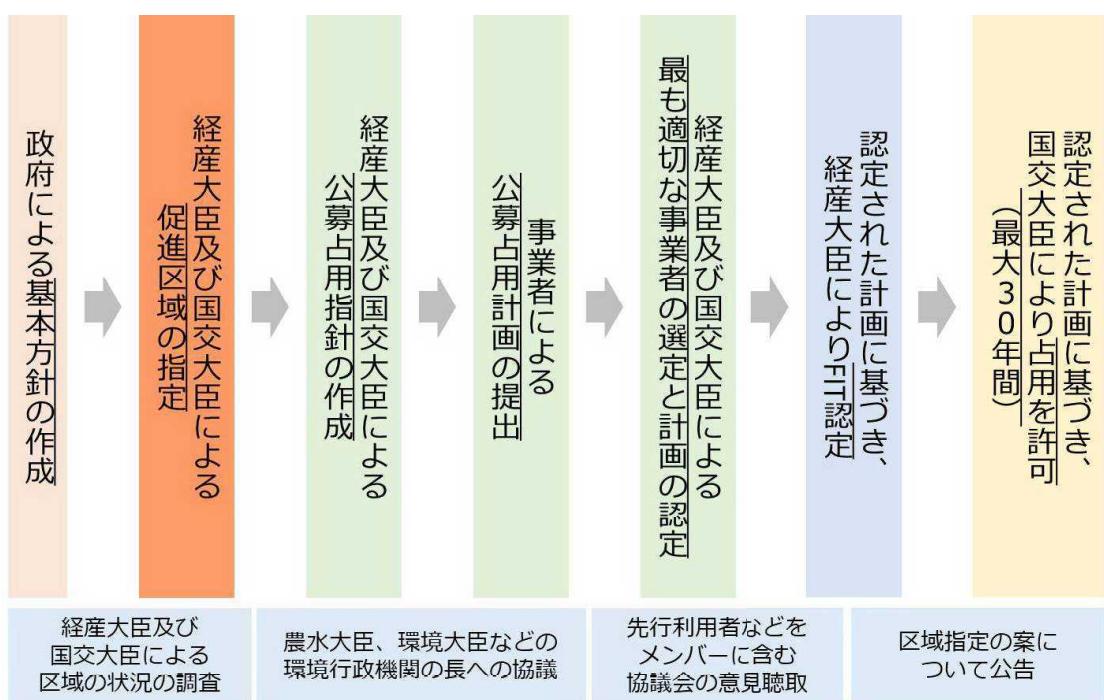
図 2-1 SDGsにおける7.aの定義

洋上風力発電導入は、海洋再生可能エネルギーの利用促進が我が国周辺の広大な海域の開発・利用を有効に進める観点から、海洋政策上の需要課題として海洋基本計画にも位置付けられている。

洋上風力発電には、①地球温暖化対策に有効：洋上風力発電は火力発電に比べ、二酸化炭素の排出量が少なく地球温暖化対策に有効である、②経済性確保：大規模に開発できれば発電コストが火力発電並であるため、経済性も確保できる可能性のあるエネルギー源である(ただし、我が国では更なるコスト低減が求められる)、③地元産業への好影響：洋上風力発電設備の設置・運転・維持管理における地元資材の活用や雇用創出など、地元産業への好影響が期待される。また、

発電設備の部品数が多く(約 1~2 万点)、関連産業への波及効果も期待される、という主に 3 つの特徴がある。

2018 年 11 月に成立した「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」(以下、「再エネ海域利用法」という。)では、従来、一般海域での統一的なルールがなかったことに対して、図 2-2 に示すように、一般海域で洋上風力の導入を目的とした「促進区域」の指定が可能になり、一般海域で最大 30 年間の占用期間が担保されるようになった。また、海運や漁業など地域の先行利用者と調整を行う仕組みが整備された。



経済産業省資源エネルギー庁 国土交通省港湾局による「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－」基に作成

図 2-2 再エネ海域利用法に基づく手続きの流れ

同法の成立を受け、多くの自治体が洋上風力発電所の誘致に意欲的に取り組んでおり、発電事業者の投資意欲も大いに高まっている。

また、閣議決定した基本方針には 4 つの基本原則、目標が整理されている。この基本原則、目標を踏まえつつ、共存共栄のためのありかたが議論されているところである(図 2-3)。

## 1. 長期的、安定的かつ効率的な発電事業の実現

- ・長期間にわたり海域を占用することから、信頼性があり、かつ国民負担抑制のためのコスト競争力のある電源を導入することが重要。
- ・長期的、安定的かつ効率的な発電事業の実現を目指す。

## 2. 海洋の多様な利用等との調和

- ・漁業等と共に共存共栄した海洋再生可能エネルギー発電事業を実現する。

## 3. 公平性・公正性・透明性の確保

- ・コスト低減や先進的な技術開発等の事業者の創意工夫を後押しするため、公平性・公正性・透明性を確保し、適切な競争環境を実現する。

## 4. 計画的かつ継続的な導入の促進

- ・洋上風力産業の健全な発展を図るために、継続的な市場をつくることが重要であることから、計画的かつ継続的な洋上風力発電の促進を図る。

内閣府による「再エネ海域利用法基本方針」を基に作成

図 2-3 再エネ海域利用法基本方針に掲げる 4 つの目標

促進区域の指定には、地域関係者などとの調整が必要になることから、地域に関する情報を都道府県から収集し、検討が進められた。既に一定の準備段階にすんでいる 11 区域のうちから、4 区域(秋田県能代市・三種町・男鹿市沖、秋田県由利本荘市沖(北側・南側)、千葉県銚子沖、長崎県五島市沖)が特に有望な区域と位置付けられ、地域の協議会組織や国による風況・地質調査の準備を直ちに開始することが、2019 年 7 月に決定された(図 2-4、図 2-5)。

- 都道府県等からの情報収集（2019年2月8日～4月15日）を踏まえ、再工ネ海域利用法における促進区域の指定に向けて、既に一定の準備が進んでいる区域（11区域）を整理した。
- このうち、4区域については、有望な区域として、協議会の組織や国による風況・地質調査の準備を直ちに開始することとした。



図 2-4 促進区域の指定状況

### 促進区域の指定基準

#### 第1号 自然的条件と出力の量

- ✓ 気象、海象その他の自然的条件が適当であり、海洋再生可能エネルギー発電設備の出力の量が相当程度に達すると見込まれること。

#### 第2号 航路等への影響

- ✓ 当該区域及びその周辺における航路及び港湾の利用、保全及び管理に支障を及ぼすことなく、海洋再生可能エネルギー発電設備を適切に配置することが可能であること。

#### 第3号 港湾との一体的な利用

- ✓ 海洋再生可能エネルギー発電設備の設置及び維持管理に必要な人員及び物資の輸送に関し当該区域と当該区域外の港湾とを一体的に利用することができる。

#### 第4号 系統の確保

- ✓ 海洋再生可能エネルギー発電設備と電気事業者が維持し、及び運用する電線路との電気的な接続が適切に確保されることが見込まれること。

#### 第5号 漁業への支障

- ✓ 海洋再生可能エネルギー発電事業の実施により、漁業に支障を及ぼさないことが見込まれること。

#### 第6号 (ほか)の法律における海域及び水域との重複

- ✓ 渔港漁場整備法により市町村長、都道府県知事若しくは農林水産大臣が指定した漁港の区域、港湾法に規定する港湾区域、海岸法により指定された海岸保全区域等と重複しないこと。

「再工ネ海域利用法」第8条第1項を基に作成

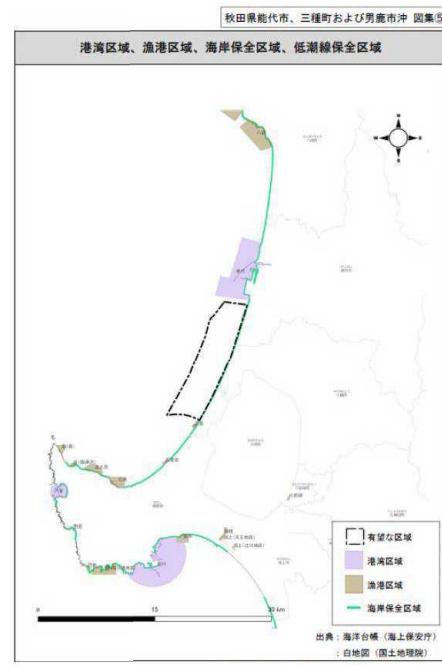


図 2-5 促進区域の指定基準の概要

洋上風力発電は、欧州を中心に導入が進んでいるものの、我が国も、同法の成立を受け、世界有数の長大な海岸線を有する海洋国家である特徴を生かし、洋上風力発電の導入拡大が加速されることが期待されている。

特に、同法により、今後の洋上風力導入に向けて、地元との共存共栄の仕組みが図れるかということが重要視されており、協議会にて議論されることとなる。協議会の具体的な論点については、図 2-6 に示す通り、整理することができる。

- ・ 洋上風力プロジェクトは、長期にわたり海域を占用すること、地域の先行利用者等の関係者との調整が必要なことに加えて、特に部品数の多さ・長期メンテナンスの必要性により地域経済等への波及効果が大きいことから、①事業の実施能力、②地域との調整や事業の波及効果という観点から事業実現性に関する要素を評価する必要。

価格 (120点)		事業実現性に関する要素 (120点)	
		事業の実施能力 (80点)	地域との調整、地域経済等 への波及効果 (40点)
• 供給価格の額		<例> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業実施実績</li> <li>・事業計画</li> <li>・リスク分析</li> <li>・故障時の速やかな修繕等による電力の安定供給</li> <li>・将来的な価格低減に向けたサプライチェーン形成</li> <li>・最先端技術の導入 等</li> </ul>	

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資料」を基に作成

図 2-6 公募占用計画の評価の全体像

今後、洋上風力導入にあたっての課題をまとめると、以下の通り整理することができる。

#### (1) 基地港の計画的な整備

洋上風力発電の導入を確実に進め、また、工事を効率的に実施し、コストを低減するために、大規模な基地港の整備が必要不可欠である。

#### (2) 系統制約の克服

系統連系に関して、電力会社間連系線の増強等、広域運用の拡大に対する検討が必要である。また、風力連系点近傍及び域内の電力輸送、さらには電力会社間連系線活用のための地内送電線の増強等の検討が必要である。

#### (3) 新たな産業の創出

洋上風力発電導入により、新産業が形成され、長期安定的な産業需要や地域雇用が生まれる可能性が高いといわれている。風力発電設備はもともと構成する部品が多く、かつ多岐にわたるため、経済波及効果が大きい。洋上風力発電事業に関しては、例えば、風車基礎、タ

ワー、ブレード等の製造、SEP 船等の工事用船舶の新造、風車スペアーツの製造、風車及び基礎のメンテナンス業務、建設用及びメンテナンス用の港の整備等がある。海上風力関連産業は、輸送等の制約や効率性重視により、陸上風力関連産業にくらべて適地近傍に集積する傾向がより強まることが想定され、地元及び国内への高い経済波及効果が期待される。

以上のことから、本調査事業は、SDGs7 の達成に向けて取り組む意義が高く、以下 2 点としてまとめることができる。

- I. 本調査事業では、経済産業省資源エネルギー庁の示す 2030 年度の電源構成における再生可能エネルギー比率(22~24%程度)に対して、現在の保有再エネ電源(太陽光、バイオマス)に加え、わが国でもイノベータイプで今後の社会的期待の高い電源としての海上風力発電による電源創出にチャレンジしようとしている。
- II. 日本の供給電力の約 1/3、世界のエネルギー消費量の約 4 割を占める「石炭」に関しても重要なエネルギー資源ととらえ、「石炭」をクリーンに活用するクリーン・コール・テクノロジーの開発と普及を進め、無電化地域の解消に貢献し、エネルギーの公平な利用による豊かな暮らしを世界中のすべての人に届ける取り組みを推進する。

### 2.3. SDGs「12 つくる責任つかう責任」達成に向けた位置づけ

当該目標のうち、本調査事業は 12.5 に位置付けられるものである(図 2-7)。

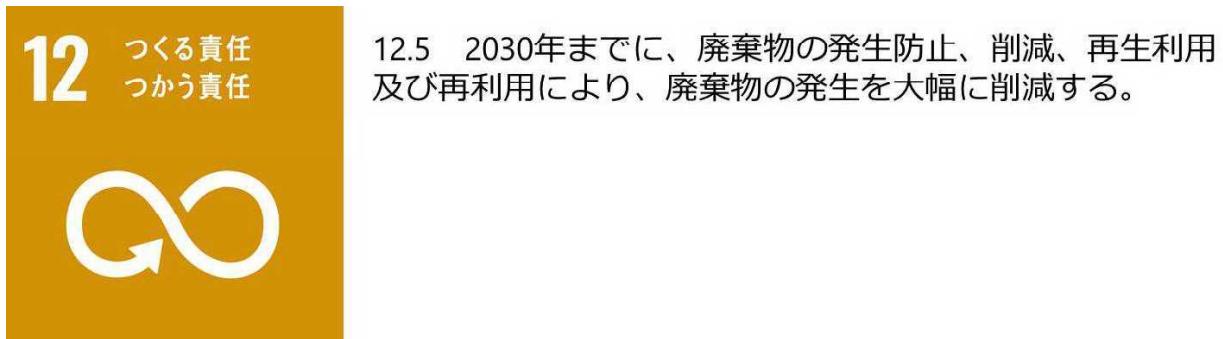
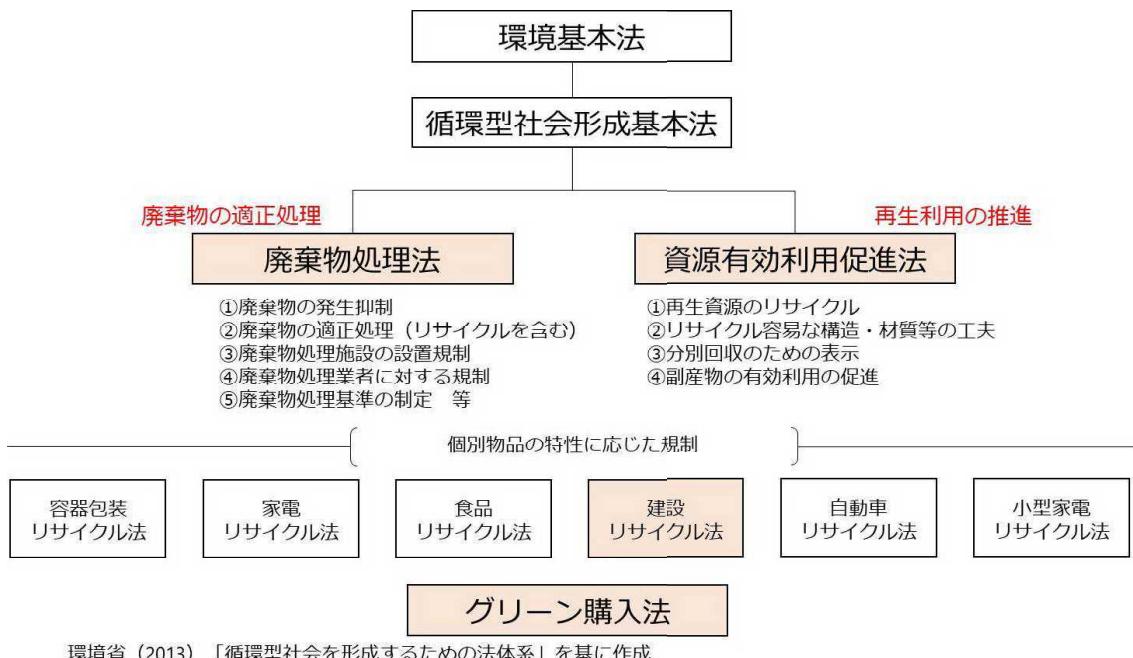


図 2-7 SDGs における 12.5 の定義

循環型社会を形成するための法体系は図 2-8 の通り整理できる。



環境省（2013）「循環型社会を形成するための法体系」を基に作成

図 2-8 循環型社会形成に向けた法体系

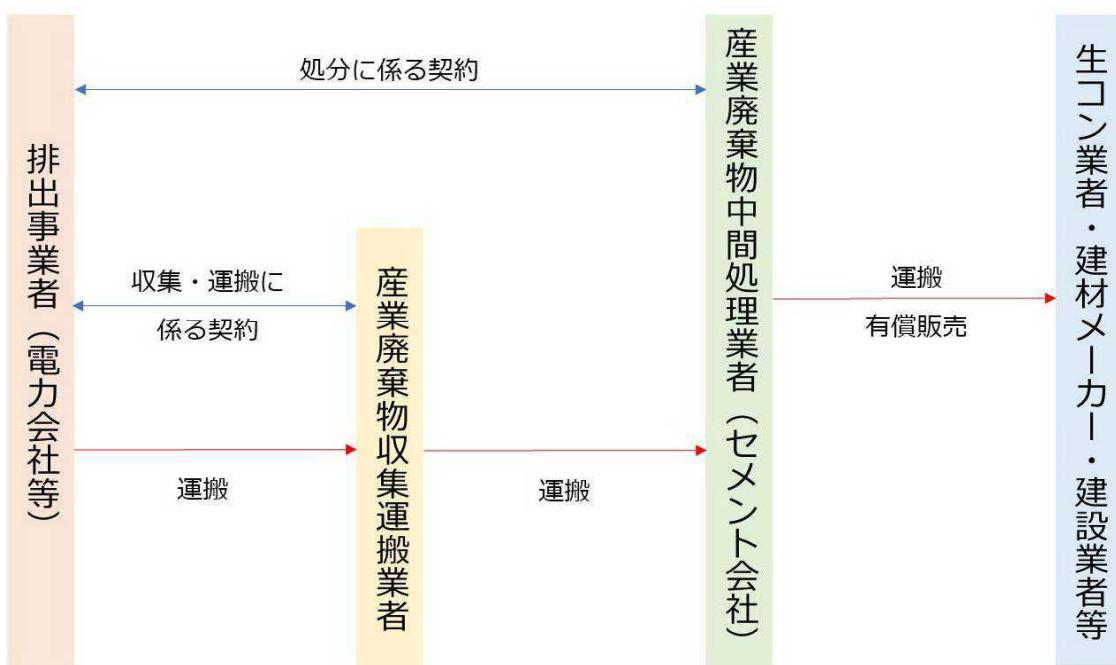
このうち、石炭灰の利用促進に密接に関連する法律について、関連事項を整理する。

### (1) 廃棄物処理法

廃棄物の排出抑制と適正処理(分別、保管、収集、運搬、再生、処分等)による、生活環境保全と公衆衛生の向上を目的とする法律。なお廃棄物といは、「占有者が自ら利用し、又は他人に有償で譲渡することができないために不要となったもの」で、「法による適切な管理下に置くことが必要」であり、廃棄物に該当するか否かは、「その物の性状、排出の状況、通常の取扱い形態、取引価値の有無及び占有者の意思等」総合的に勘案して判断すべきとされている(環境省(2013)「行政処分の指針について(通知)」環廃産発第 1303299 号)

産業廃棄物(事業活動で生じた、燃え殻、汚泥、廃油、廃酸、廃アルカリ、廃プラスチック類その他政令で定める廃棄物)は、排出事業者が処理責任を持ち、事業者自身、もしくは許可業者が排出事業者の委託を受けて、処理する義務を負う。石炭灰関連では、フライアッシュが「ばいじん(煤塵)」、クリンカッシュが「燃え殻」に該当する。

石炭灰有効利用の多くは、中間処理の形態で行われており、セメント原料利用の処理フローを図 2-9 に示す。中間処理とは、生活環境保全や人の健康に支障が出ないように、廃棄物に措置(減量・減容化、安定化、無害化等)を加えることをいう。



(社) 土木学会 エネルギー土木委員会（2003）「石炭灰有効利用技術について」の図を基に作成

図 2-9 石炭灰の中間処理フロー

廃棄物は、再資源化または再利用される場合を除いて、最終的には埋立処分される。原則として、排出事業者自らが、政令にもとづく処理基準に則って処理しなくてはならないため、電力会社は、もっぱら発電所の構内もしくは近傍に処分場を設置して埋立処分し、一部を外部の最終処分場に処分している。

石炭灰は、微量ながら重金属等の有害物質を含有するため、管理型最終処分場(遮水工、排水処理設備等の設置が必要な処分場)に埋立処分しなくてはならない。

フライアッシュは極めて細かい粉塵のため、加湿処理を施すか、専用の車両・船舶を用いて運搬し、処分場でも飛散防止のため散水や覆土(クリンカッシュ等を使用)などの処置が必要である。また、処分場内の水は有害物質を含むため、排水処理設備を設置し、適正処理してから外部に排出する。

## (2) 資源有効利用促進法

資源の有効利用促進を目的に、①製品の環境配慮設計(軽量化、解体の容易化等)、②使用済製品の自主回収・リサイクル、③製造工程で生じる副産物のリデュース・リサイクルなど3Rに関する取り組みを促進する法律である。

10業種 69品目を対象に、以下7類型の制度を設け、関係事業者に一定の義務を課し、自主的取組の促進を図っている。

- <類型 1>副産物の発生抑制や再資源化を行うべき業種
- <類型 2>再生資源・再生部品を利用すべき業種
- <類型 3>原材料等の合理化を行うべき製品
- <類型 4>再生資源又は再生部品の利用の促進を行うべき製品
- <類型 5>分別回収を促進するための表示を行うべき背景
- <類型 6>自主回収・再資源化を行うべき製品
- <類型 7>再生資源として利用することを促進すべき副産物(指定副産物)

政令により、「電気事業(供給量 1.2 億 kwh/年/以上)が排出する石炭灰」は、<類型 7>の指定副産物に定められており、主務大臣(経済産業大臣)は、事業者に対して、「エネルギー供給業務」「石炭灰の発生量」「再生資源の販売量・利用促進関連設備の状況、その他再生資源利用促進に関する事項」について報告させ、関連施設・関連帳簿書類の立入検査ができる。

その際の判断基準は、「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」(平成 3 年通商産業省令第 57 号)に定める以下 5 項目である。

- ① 規格又は仕様による加工  
JIS A6201(コンクリート混和材・フライアッシュセメント原材料)  
それ以外については、事業者と石炭灰利用者が協議して定めた仕様
- ② 石炭灰の利用促進に必要な下記設備の整備  
クリンカ:クリンカホッパー、脱水槽、灰沈殿池、灰処理ポンプ及び灰輸送管  
フライアッシュ:集じん装置、サイロ、廃輸送管及び分級器
- ③ 石炭灰の用途拡大および品質向上のための技術の向上
- ④ 石炭灰利用促進計画(下記事項を記載)の年度開始前の作成と、実施状況の記録
  - 一 石炭灰の発生予定数量
  - 二 石炭灰の利用予定数量
  - 三 石炭灰の利用の促進のために必要な設備の整備に関する事項
  - 四 石炭灰の利用の促進のために必要な技術の向上に関する事項
  - 五 前各号に掲げるもののほか、石炭灰の利用の促進に関する事項
- ⑤ 石炭灰利用者に対する、当該石炭灰の品質・組成その他の必要情報の提供

なお、政令で定める「指定副産物」は、上記石炭灰と「建設業(施工金額 50 億円/年以上)が排出する各種副産物」である。

### (3) グリーン購入法

循環型社会形成には「再生品等の供給面の取組」だけでなく、「需要面からの取組が重要」という観点に基づいて制定されたもので、国等の公的機関が率先して「環境物品等(環境負

荷低減に資する製品・サービス)の調達を推進」するとともに、「環境物品等に関する適切な情報提供」を促進することで需要を喚起し、持続的発展が可能な社会の構築を推進することを目指している。

閣議決定された「基本方針」(国及び独立行政法人等の、環境物品等の調達推進基本方針)に基づいて、以下の責務等を定めている。

- ・ 国等の各機関は、毎年度「調達方針」を作成・公表し、実績を取りまとめて公表
- ・ 地方公共団体は、毎年度「調達方針」を作成して調達を推進(努力義務)
- ・ 事業者・国民は、「物品購入等に際し、できる限り環境物品等を選択」(一般的責務)
- ・ 環境物品等に関する情報提供①事業者による情報提供、②環境ラベル等による情報提供、③国による情報提供及び検討

石炭灰関連では、「基本方針(平成 26 年 2 月)」に定める「特定調達品目」として、「公共工事」の「資材、建設機械、工法及び目的物の品目」リストの中に、混合セメント(フライアッシュセメント)と吹付けコンクリート(フライアッシュを用いた吹付けコンクリート)の資材が指定されている。他にも、フライアッシュは建設汚泥・建設発生土の土壤改良に有効で、クリンカアッシュは透水性舗装や屋上緑化に用いた事例がある。

#### (4) 建設リサイクル法（建設工事に係る資材の再資源化に関する法律）

特定建設資材を用いた建設物等に係る、一定規模以上の解体工事や新築工事(対象建設工事)について、その受注者等に対し、「分別解体等」及び「再資源化等」を義務付けるものである(図 2-10)。

本法は、石炭灰には直接的には関係しないが、建設発生土や浚渫土砂の土質改良剤に石炭灰が有効利用可能で、需要促進につながる可能性が見いだせるものの、大量に供給される建設副産物再生資源が、石炭灰再生品と競合する懸念がある。これからも、今後の石炭灰利用促進を検討するにあたって本法との関連性にも考慮する必要がある。

このように、現在、再生利用される廃棄物の増大に向けて、資源枯渇および環境意識の高まりと法整備の影響からも、様々な廃棄物・副産物がリサイクルされている。

地元行政や地元住民の立場からは、地元で発生する副産物を地元でリサイクルする地産地消型リサイクルは、廃棄物を減らすこととなるとともに、それに伴う雇用創出等につながることからも期待されるビジネス形態と言える。特に、建設副産物においては、石炭灰等の産業系廃棄物・副産物と大きく異なるのは、全国どこでも発生し、再利用先である建設現場に、距離的にも業種的にも近接している点である。建設副産物の発生は新しい建設工事と表裏一体の場合が多く、地域的な需給ミスマッチも起こりにくい。

しかし、国土交通省の”リサイクル原則化ルール“では、国交省発注工事について、現場から「40km 以内に工場のある再生骨材」「40km ないし運搬時間 1.5 時間以内に工場のある再生加熱アスファルト混合物」「50km 以内で搬出された建設発生土及び建設汚泥処理土」の、経済性にかかわらない原則使用をルール化しており、域内で発生した建設副産物の利用が

強力に促進されている。

類似の指針を定める自治体も多い中で、秋田県では、「秋田県リサイクル製品認定制度」、「秋田県フライアッシュ混合プレキャストコンクリート製品使用基準」及び「秋田県石炭灰リサイクル再生碎石使用基準」が定められており、秋田県内の石炭灰活用促進に向けた一定の成果が出ており、施工実績も挙がっている。

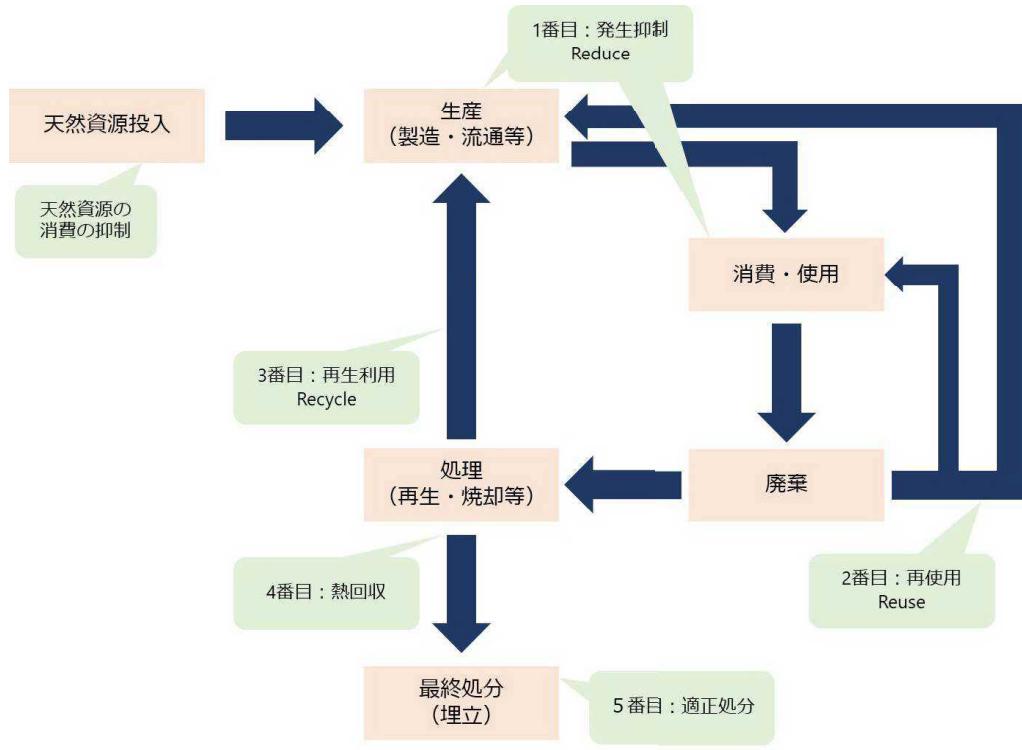


図 2-10 循環社会フロー

以上のことから、本調査事業は、SDGs12 の達成に向けて取り組む意義が高く、以下 2 点としてまとめることができる。一方で、各種法整備の観点から考えると、以下 2 点に加え、新たな視点を取り入れ、新しい廃棄物利用システム構築に向けた指針策定が必要であると考えられる。

- I. 廃棄物の再生利用及び再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減する。
- II. 地元の基幹産業としての石炭火力発電所において発生する産業副産物の有効利用に向けて、新たな雇用創出に結びつける。

## 2.4. SDGs「14 海の豊かさを守ろう」達成に向けた位置づけ

当該目標のうち、本調査事業は、14.2 に位置付けられるものである(図 2-11)。



14.2 2020年までに、海洋及び沿岸の生態系に関する重大な悪影響を回避するため、強靭性（レジリエンス）の強化などによる持続的な管理と保護を行い、健全で生産的な海洋を実現するため、海洋及び沿岸の生態系の回復のための取組を行う。

図 2-11 SDGs における 14.2 の定義

平成 6 年に、国交省により港湾環境政策「環境と共生する港湾 エコポート」が公表されており、その中で、具体的な検討施策のポイントが 3 点明記されている。

### <ポイント 1>環境負荷の低減

- ・ 港湾の整備・運営における環境への影響の回避・低減・代償措置の一層の充実。
- ・ 港湾施設の建設や改良における海水交換型防波堤や緩傾斜護岸等の環境配慮型構造の積極的導入
- ・ 深刻化する廃棄物問題に対応する廃棄物海面処分場の整備推進と港湾のゼロエミッション化の検討
- ・ 地球環境にやさしい自然エネルギーの活用

### <ポイント 2>良好な自然環境の形成

- ・ 生物・生態に配慮した環境の積極的な形成に資する干潟や藻場をはじめとする自然環境の復元推進

### <ポイント 3>リサイクルの推進

- ・ 港湾工事における建設副産物対策と産業副産物活用の推進。静脈物流への対応(会場リサイクルネットワークの構築)
- ・ 浚渫土砂の減容化や再資源化の実用化推進

この港湾環境政策では、我が国の港湾が物流・産業・生活の場としての役割を担い、環境と共に豊かな港湾の環境を次世代に継承することにより、持続可能な発展を遂げていくことが求められている。そのためには、多様化する環境問題に適切に対応していくとともに、過去に劣化・喪失してきた自然環境を取り戻し、港湾のあらゆる機能に環境配慮を取り込んでいくことが不可欠である。

すなわち、港湾の開発・利用と環境の保全を車の両輪として捉え、港湾のグリーン化を図っていくことが望まれている(図 2-12)。



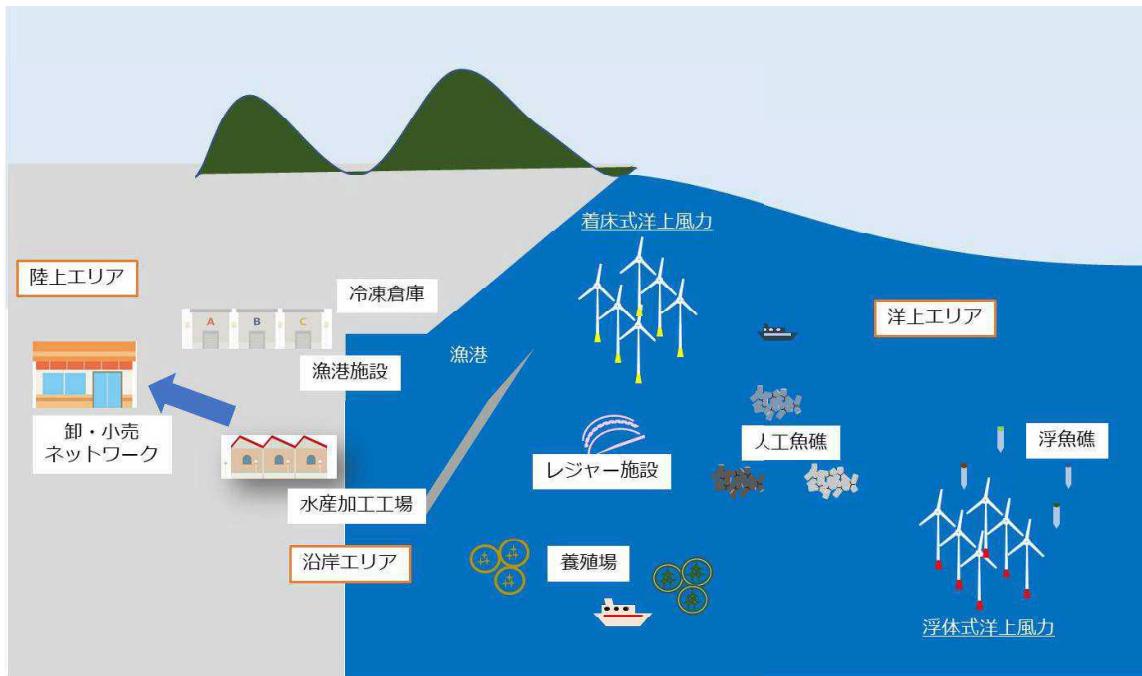
国土交通省資料

図 2-12 港湾環境政策による港湾行政のグリーン化

また、洋上発電導入における漁業共生についても、欠かすことができない。一般社団法人海洋産業研究会では、「洋上風力発電等の漁業協調の在り方に関する提言」をまとめており、我が国の洋上風力発電導入促進と沿岸漁業・地域振興の在り方に言及している（図 2-13）。

同提言の中で、海洋再生可能エネルギーの中で、洋上風力発電の事業化が進んでいることを背景に、洋上風力発電導入に伴う漁業補償問題をとらえ、今後求められるのが、漁業協調型洋上ウインドファームであると提言している。これは、洋上ウインドファームが建設されることで、再生可能エネルギー利用が促進されるだけでなく、沿岸漁業の活性化や新たな漁場の造成、関連産業等の創出により漁村や地域の活性化を図るもので、発電事業者と漁業者がともに利益を享受できる事業形態とする概念とされている。

洋上風力発電導入をはじめ、海洋における新たな事業等を開始する際には、漁業共生の観点を取り入れ、生物・生態系にマイナス影響を与えないよう配慮するとともに、漁業操業をしていない未利用海域に優先的に立地することが求められる。その上で、計画立案プロセスの見える化に努める、取組姿勢として、漁業（特に漁業権）に関する正しい知識に基づいて取り組むことが求められる。



(一社) 海洋産業研究会の「洋上風力発電等の漁業協調の在り方に関する提言」(第2版)を基に作成

図 2-13 洋上風力発電導入と漁業共生のイメージ

また、海域というフィールドに目を向けると、海洋生物によって大気中の二酸化炭素が取り込まれ、海域で貯留された炭素、森林など陸域で貯留される炭素「グリーンカーボン」と区別化して、定義された「ブルーカーボン」の存在も考慮することが必要である。

陸や海は、地球における炭素の主要な貯蔵庫となっているとともに、大気中の二酸化炭素の主要な吸収源にもなっている(図 2-14)。

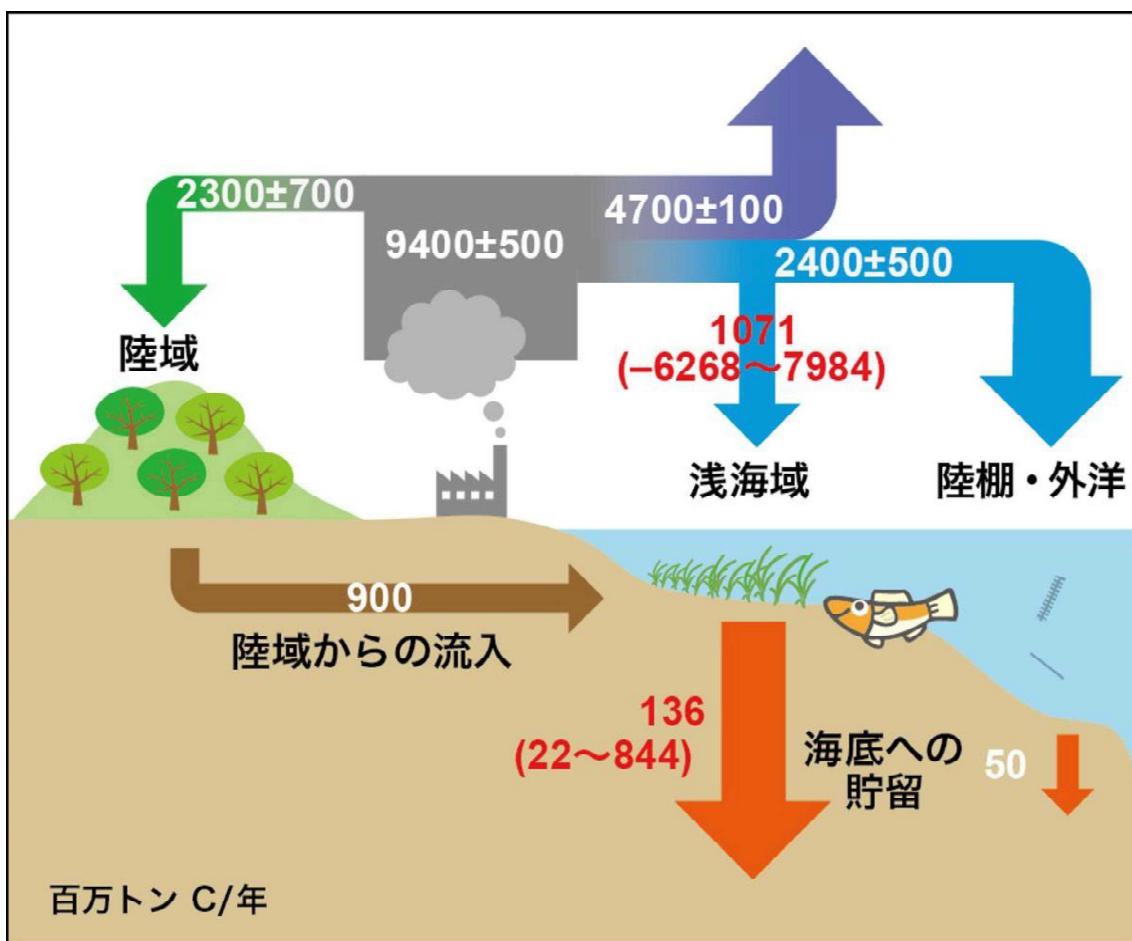


図 2-14 地球全体の炭素の流れ

(出典:国際環境経済研究所 HP)

特に、浅海域では、海草や海藻による吸収速度が速いことが報告されており、今後の温暖化対策に資する事項としても重要である。

以上のことから、本調査事業は、SDGs14 の達成に向けて取り組む意義が高く、以下 2 点としてまとめることができる。

- I. 洋上風力発電に用いられる風車構造物に付着する海生生物やそのまわりには魚類が集まることが確認されている等、海洋資源の保全と活用に貢献する。洋上風力発電で海の豊かさにプラスの価値を見出す。
- II. 石炭灰の魚礁などへの活用による CO<sub>2</sub> の吸収、ブルーカーボンの活用とその国際基準の制定への取組を展開する。

このように、本調査事業は、再エネ推進、リサイクル推進、漁業振興を通じて地方創生に貢献し、地域との共生を実現するものである。具体的には、地元企業とのコラボレーションによる事業展開

を進め地域産業の活性化に貢献するものである。また、新たな発電所の運営、設備のメンテナンスなどによる雇用創出を進め、地域雇用の創出に結びつけるものである。

### 3. 石炭灰の特性を生かした用途把握のための調査

#### 3.1. 港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等の把握

本章で取り扱うリサイクル材料は、以下表 3-1 に示す通りである。

表 3-1 リサイクル材料一覧

建設副産物	建設発生土
	浚渫土砂
	アスファルト・コンクリート塊
	コンクリート塊
	建設発生木材
	建設汚泥
産業副産物等	鉄鋼スラグ
	石炭灰
	非鉄スラグ
	貝殻
	エコスラグ(一般廃棄物及び下水汚泥溶融スラグ)
	破碎瓦

国土交通省港湾局、航空局「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」を基に作成

##### 3.1.1. 全国の港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等実態調査

###### (1) 実態一覧

国土交通省の「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」には「全国の港湾施設におけるリサイクル材料の利用状況実態調査」として、全国各地の利用実績 57 例が掲載されている(表 3-2)。

各事例について、表 3-2 にみるとおり、材料・用途のほか、件名、機関、数量、概要(使用の目的や経緯)がまとめられている。

実施機関は港湾事務所関連が多いが、県・市などの自治体や、電力や製鉄分野の民間企業が実施したケースもみられる。また、件名・機関から事例の所在地を判定した結果では、愛知県内が 6 例と最多で、次いで北海道内・広島県内が各 5 例、福島県内が 4 例などとなっていた。(所在地が判定できない事例:3 例あり)

この表をもとに、まず、リサイクル材料と使用用途の組合せとして、該当件数をとりまとめた結果を表 3-2 に示す。リサイクル材料でみると、実績件数が最多であるのは、鉄鋼スラグ二次製品(9 例)、であり、次いで、高炉スラグとフェロニッケルスラグ(各 8 例)、製鋼スラグ(6 例)、建設発生土(4 例)の順となり、スラグ関係の材料の利用が上位を占めている。

一方、用途別にみると、「藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等」が最多(10 例)で、次いで「盛土材、覆土材、載荷盛土材」(8 例)、「埋立材」(7 例)、「中詰材」(6 例)、「路盤材」(5 例)の

順で、本体工～舗装工にかけての用途への適用が多いほか、藻場や干潟造成など、港湾整備に付随する関連事業に活用される例が多くなっている。

さらに「材料一用途」の組合せでは、「鉄鋼スラグ二次製品－藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等」が 4 例、「フェロニッケルスラグ－盛土材、覆土材、載荷盛土材」が 3 例となっていた。

表 3-2(1) 全国の港湾施設におけるリサイクル材料の利用事例

No.	リサイクル材料	用途	件名	実施機関	実施数量	概要
No.1	リサイクル材料					
No.1	建設発生土	(7)捨石	敦賀港山北地区防波堤基礎工事(そ02)	敦賀港湾事務所	5550m <sup>3</sup>	トネル工事(アーチ)石を活用し、防波堤基礎アーチの基礎石として適用。
No.2	建設発生土	⑥中詰材	茨城県岸和田郡那珂川町中央ふ頭港地区岸壁(-12m)高張渠渠工事	茨城県港湾・空港整備事業事務所	45680m <sup>3</sup>	無償提供でのアーチ工事としての使用。
No.3	建設発生土	⑦盛土材・裏土材・軟岩盛土材	浜出港新井地区臨港道路用地造成その他工事	浜出港新井地区臨港道路用地造成その他工事	2500m <sup>3</sup>	過去の路床盛土・路盤盛土としての適用成績から、盛土材への適用。
No.4	建設発生土	⑧埋立材	徳島県行場港沿岸路延伸事業	小松島島港・空港整備事業事務所	17000m <sup>3</sup>	首都圏発生土を埋立て料・盛土材として利用。
No.5	建設土砂(粘性土系)	⑤サンドコンハシヨハイル用材	新潟川河口砂処分場雨水処理土製造工事	北九州港湾・空港整備事業事務所	1200m <sup>3</sup>	淡渕土砂をセメントと混合・高压脱水処理で製作し、適合性試験。
No.6	浚渫土砂	⑩盛土材・裏土材・軟岩盛土材	中城海港土砂処分場・海岸外2km製造工事	那覇港港・空港整備事業事務所	280t/m <sup>3</sup>	中城港湾の同施工事例成績から、盛土材として適用。
No.7	浚渫土砂(砂質系)	⑪漁場・浅場・干潟造成、覆砂材・人工砂浜等	鳥取県宍道代地区防波堤(第6回)西側造工事	境港湾・空港整備事業事務所	5000m <sup>3</sup>	堆積土砂が同一形状・基礎砂と堆積土砂が用意に分離することから併用。
No.8	アスファルトコンクリート塊	⑫路盤材	新潟主港清掃路改良工事	新潟港港・空港整備事業事務所	2016m <sup>3</sup>	浮遊基層の鋪装で再生材料実績あり適用。
No.9	アスファルトコンクリート塊	⑬A型製骨材・A3フライエー材	中城港(新潟地区)岸壁(-1.3m)改修工事	那覇港港・空港整備事業事務所	201m <sup>3</sup>	前記通りの成績を元に適用。
No.10	4.コンクリート塊	⑭中詰材	相馬本港地区防波堤沖災害復旧築造工事	小名浜港・空港整備事業事務所	44000m <sup>3</sup>	コンクリート塊、切込碎石、鋼ラックをケーンの中央部として再利用。
No.11	4.コンクリート塊	⑮路盤材	平成20年度鹿児島港(中央地区)防波堤沖築造工事	鹿児島島港・空港整備事業事務所	13個(1個25t-)	骨材の品質等の実績結果を元に、不要なクリートを防波堤の根固め材として再利用。
No.12	4.コンクリート塊	⑯路盤材	中城港(新潟地区)岸壁(-1.3m)改修工事	那覇港港・空港整備事業事務所	542m <sup>3</sup>	コンクリート塊、切込碎石、鋼ラックをケーンの中詰め材として再利用。
No.13	建設汚泥	⑰路床盛土材	平成21年度(園芸)新潟港(東港地区)岸壁(-12m)西(1号)築造工事(その2)	新潟港港・空港整備事業事務所	2600m <sup>3</sup>	建設汚泥物発生抑制のための使用。
No.14	7.高炉スラグ(焦粉)	⑲混和材	平成23年度衣浦港中央ふ頭地区改良工事	三河港港事務所	85m <sup>3</sup>	
No.15	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	⑳サンダマット	姫路港新宮地区埋立地内サンダマット工		145700m <sup>3</sup>	質量な高炉水砕スラグを利用。
No.16	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉑サンコンハシヨンハイル用材	博多港サンコンハシヨンハイル用材		3500m <sup>3</sup>	高炉水砕スラグを有効利用。
No.17	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉒盛土材	刈田港埋立地盛土工	新日本製鉄室蘭製鉄所内里立試験工事		質量な高炉水砕スラグを利用。
No.18	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉓埋立材	新日本製鉄室蘭製鉄所内里立試験工事	新日本製鉄	—	新日本製鉄
No.19	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉔埋立材	石川県七尾港埋立工事	石川県七尾港事務所	5000m <sup>3</sup>	副産物の有効利用。
No.20	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉕盛土材	港南駅周辺埋立地の裏土材への高炉水砕スラグの活用	和歌山県土木部	171600m <sup>3</sup>	天然砂ではがらく込みがあり盛り込みがあるため、経量か断卦が大きくなる高炉水砕スラグが採用。
No.21	7.高炉スラグ(土工用水砕スラグ)	㉖干潟	三河湾の港湾工事用材料としての適用技術の研究、製鋼スラグ	中船地方整備局	900m <sup>3</sup>	天然砂ではがらく込みがあり盛り込みがあるため、経量か断卦が大きくなる高炉水砕スラグが採用。
No.22	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉗サンコンハシヨンハイル用材	製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究、製鋼スラグを用いた海上SCP試験(工)	広島県、財・沿岸開発技術研究センター、港科 ソラブ協会	692000m <sup>3</sup>	従来材料との比較による適用性検討。
No.23	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉘中詰材	四日市港港ヶ浦干瀬頭前港頭改選工事	四日市港港ヶ浦干瀬頭前港頭改選工事、財・沿岸開発技術研究センター	1箇	試験函の挙動・環境制御結果を元に、施工実験。
No.24	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉙裏土材	福井港本港地区航路整備事業	福井港港・空港整備事業事務所	250000m <sup>3</sup>	該鋼スラグ生産場であることによるコスト削減のため適用。
No.25	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉚載荷盛土材	横浜市港湾土木処理立載荷盛土工事(載荷盛土への高炉後冷・製鋼スラグ混合材の適用)	横浜市港・局港南本牧建設事務所	440,000m <sup>3</sup>	単位体積重量が大きくなりめ重きの良好な鉄鋼スラグにより盛土工事量低減のことが適用。
No.26	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉛路盤材	東京国際空港D滑走路建設工事	東京国際空港D滑走路建設工事	42000m <sup>3</sup>	重ダンプ車による耐久性向上のため適用(アルカリ分吸着は埋立にて材可能)。
No.27	8.製鋼スラグ(土工用・地盤改良用製鋼スラグ)	㉜覆砂材	福山内港底質改善実証試験工事	JFEスチール	2800m <sup>3</sup>	鉢分による底質改善効果、生物生息環境創設検証。
No.28	9.鉄鋼スラグ複合製品(水硬性スラグコンパクション材)	㉝サンコンハシヨンハイル用材	阿波灘港地区広域港港整備工事	長崎県北辰原局	3400t	水硬性スラグコンパクション材的有效適用。
No.29	10.鉄鋼スラグ二次製品(固化体)	㉞捨石	尾道永崎港港線地区治地(-2m)等港港整備等工事	広島港・空港整備事業事務所	170m <sup>3</sup>	石材代替材として有効利用するため、人工石材製造技術の適用性検証。

表 3-2(2) 全国の港湾施設におけるリサイクル材料の利用事例

No.	リサイクル材料	用途	件名	実施機関	実施数量	概要
No.30	10.鉄鋼スラグ一次製品(錫鋼スラグ&固化体)	⑨被覆石・粗粒め	製鋼プラグを利用した港湾土木資材の実証実験(被覆プラック及び根固め石)	港湾技術研究所、川崎製鉄(株)	780t(被覆)、 14000m <sup>3</sup> (根固)	適用性検討。
No.31	10.鉄鋼スラグ一次製品(錫鋼スラグ&固化体)	⑩裏埋材	徳島・松島港 沖洲(外)地区岸壁(4~5.5m)斜面・築造工事(その2)	国土交通省四国地方整備局 小松島港務所	3682m <sup>3</sup>	質量石材の圧縮強度、密度、pHを満足するため検証。
No.32	10.鉄鋼スラグ二次製品(錫鋼スラグ&固化体)	⑪埋立材	羽田那覇空港の滑走路建設工事	那覇地盤東京空港整備事務所	600,000m <sup>3</sup>	材料調達が安価的、品質の良さつき、汎用性不高いことから選用。
No.33	10.鉄鋼スラグ二次製品(錫鋼スラグ&固化体)	⑫埋立材	東京云洋埠頭北公有水面埋立工事	新日本住金株式会社	510000m <sup>3</sup>	埋め立て地盤造成のため適用。
No.34	10.鉄鋼スラグ二次製品(錫鋼スラグ&固化体)	⑬港場・護岸	東京港・若狭浦港公園(浅瀬整備	東京都都京港管理事務所	11,000m <sup>3</sup>	護岸前面に堆積成するが適用。
No.35	10.鉄鋼スラグ二次製品(錫鋼スラグ&固化体)、3.製鋼スラグ/土工作用地盤改良用製鋼スラグ	⑭港場	「山下公園面海側における水質浄化能力の回復」に向けた生物生息環境の改善手法についての共同研究	横浜市、JFEスチール	10t	目などの生物付着基盤などより、底質改善材としての機能検証のため適用。
No.36	10.鉄鋼スラグ二次製品(溶融土改質材)	⑮港場・浅場・干潟造成	環境省 環境事業実証事業における浅場・干潟造成	新日本住金株式会社	910m <sup>3</sup>	强度増加効果確認のため適用。
No.37	10.鉄鋼スラグ二次製品(生物共生材)	⑯港場・浅場・干潟造成	北海道旭毛町における漁場造成実験	新日本住金株式会社	6t	漁場造成効果監査のため適用。
No.38	11.ブライアンシユ(非-JIS版)	⑰港盤材	原町火力発電所北防波堤・ロック設置工事	東北電力㈱	11000t	施工コスト縮減、長期強度確保のためF&Cコンクリートをしよう。
No.39	11.ブライアンシユ(非-JIS版)	⑱中詰材	常陸那珂港東防波堤本体工事	鹿島港湾・空港整備事務所	880m <sup>3</sup>	過去の調査研究結果を元に適用。
No.40	11.ブライアンシユ(非-JIS版)	⑲路盤材	本館港純化工事	沖縄県土木建設部沖縄本島事務所	310t	河川土砂碎材の使用。
No.41	13.石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)	⑳路床盛土材	小名浜港連絡橋・臨港道路・陸上側道路(「ルーフル」工法)	東北地方整備局小名浜港湾事務所	3000m <sup>3</sup>	高いせん断抵抗角(35度以上)、高PH、コーン指数、比較的低い持続時間の適用。
No.42	13.石炭灰二次製品(石炭灰重量物)	㉑覆砂材	広島港海岸中央東地区港岸安定化等工事	広島港湾・空港整備事務所	8680m <sup>3</sup>	港湾環境改善手法実証。
No.43	13.石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)	㉒路盤材	小名浜港1号埠頭・船渠引き揚げ場修理	福島県港湾建設事務所	2000m <sup>3</sup>	地元元石炭灰の骨格活用のための試験施工。
No.44	15.フェロニッケルスラグ	㉓中詰材	鳥取港千代地区防波堤(第1)西)築造工事	境港・宍道湖港事務所	340m <sup>3</sup>	砂より單位体積量が大きいことからコスト削減のため適用。
No.45	15.フェロニッケルスラグ	㉔被覆石・粗粒め	㉔被覆石・粗粒め	室蘭港港務事務所	34個	床、埋立大型構造物として試験施工。
No.46	15.フェロニッケルスラグ	㉕盛土材・覆土材・軟岩盛土材	㉕盛土材・覆土材・軟岩盛土材	函館市	1400m <sup>3</sup>	適度な透水性、耐水性すぐれ、耐候性高く、蒸湯早期着床で施工性がないため適用。
No.47	15.フェロニッケルスラグ	㉖盛土材・覆土材・軟岩盛土材	㉖盛土材・覆土材・軟岩盛土材	民間	13500m <sup>3</sup>	生産拠点が近隣一所在することから使用。
No.48	15.フェロニッケルスラグ	㉗盛土材・覆土材・軟岩盛土材	㉗盛土材・覆土材・軟岩盛土材	十和田市	2500m <sup>3</sup>	冬季低温地域で海上抑制効率、雨水等による固形や膨張等を起こさない特性を有するため適用。
No.49	15.フェロニッケルスラグ	㉘路盤材	宮古港文殊地区ユーティペイバーン造成工事	宮古市	55500m <sup>3</sup>	水浸性なく、透水性良い材料、生産拠点が近隣に所在しているため利活用。
No.50	15.フェロニッケルスラグ	㉙埋立材	阿蘇シーサイドパーク造成工事	京都府京丹波町(町名)	50000m <sup>3</sup>	透水性、安全性良好なため適用。
No.51	15.フェロニッケルスラグ	㉚路盤材	フェロニッケルスラグの環境元材としての有用性検証調査	日本金属協会	0.3m <sup>3</sup>	港場の造成材・優材としての活用に向けた検証。
No.52	17.貝殻(カタテガイ)	㉛中詰材	砂無瀬港建設工事	西鉄港湾事務所	700m <sup>3</sup>	水産庁事業での副生物活用推進モデル事業となるべく適用。
No.53	17.貝殻(カタテガイ)	㉜路盤材	宗谷港建設工事	稚内港湾事務所	2100t	地元材料活用によりコスト縮減のため適用。
No.54	17.貝殻(カタ殻)	㉝埋立材	新潟港・空港整備事務所		2t	人工魚礁構造物として用。
No.55	18.エコスラグ	㉞捨石	平成25年度新潟川外河川災害復旧工事(その3)	宮城県	1250m <sup>3</sup>	天然材料の代替材料として利用。
No.56	18.エコスラグ	㉟被覆石・粗粒・消波ダム	河川改良工事(津河川・郷川)II	愛知県安城市	2200t	生態系保全のため、環境保全型資材としての活用。
No.57	18.エコスラグ	㉟裏埋材	現年災害復旧工事(24年災第7号)	愛知県	80t	環境保全型資材としての活用。

表 3-3 リサイクル材と用途の組み合わせによる該当件数

	用途	1 コンクリート用細骨材	2 コンクリート用粗骨材	3 混和剤	4 サンドマット	5 サンドマット	6 捨石	7 中詰材	8 板覆石・根固・消波ブロック	9 裏埋材	10 盛土材、裏土材、軋荷盛土材	11 盛土材、裏土材、軋荷盛土材	12 路床盛土材	13 路盤材	14 As鋼製骨材、As樹脂成形材	15 アスファルト材	16 浅場・干潟造成、覆砂	17 浅場・干潟造成、覆砂
リサイクル材		57	0	0	2	1	4	0	3	6	4	1	2	8	7	3	5	1
1.建設発生土		4							1	1			1	1				
2.浚渫土砂		3					1					1						1
3.アスファルトコンクリート塊		2														1	1	
4.コンクリート塊		3								1	1						1	
5.		0																
6.建設汚泥		1																
7.高炉スラグ		8			1	1	1											
8.製鋼スラグ		6					1		1			1	1			1		1
9.鉄鋼スラグ混合製品		1					1											
10.鉄鋼スラグニ次製品		9						1		1		1		2				4
11.フライアッシュ		3				1			1			1						
12.		0																
13.石炭灰ニ次製品		3											1	1		1		1
14.		0																
15.フェロニッケルスラグ		8							1	1			3	2				1
16.		0																
17.貝殻		3							1					1		1		
18.エコスラグ		3							1	1	1							

## (2) 材料別実態に対する考察

表 3-3 のリストを材料別に整理し、全般および個別の材料別にみた特徴や状況について整理した。

材料別状況のまとめを表 3-4 に示す。表の記載内容とその説明は、番号、材料名、該当件数(材料毎のリスト中の該当事例の数の和)、合計数量(リストでは体積・重量・その他の記載が混在しているのでそれぞれを集計)、使用工程(該当用途を工程に対応させて集計し、多い順に記載)、長所・有益な点、短所・課題(各事例の本文説明にある情報から抽出して記載)、その他備考、の構成となっている。

(1)でも記載したとおり、鉄鋼スラグ二次製品(9 例)をはじめ、高炉スラグヒュニッケルスラグ(各 8 例)等の実績が多く、スラグ関係の材料の利用が進んでいる。これらは事例数だけでなく使用数量も多くなっている。石炭灰関係の 2 種(フライアッシュ(非 JIS 灰)、石炭灰二次製品)は各 3 例で、スラグ関係以外のリサイクル材料と同程度の活用実績である。

これまでの港湾施設でのリサイクル材料利用状況を材料別に見てみると、建設発生土については、土工をはじめ数種の工程に用いられており、とくに問題の発生もないが、材料の性質上、性状や品質のばらつき、発生と需要の時期のマッチングが課題として挙げられている。また、コンクリート塊については、形状のばらつきがあるほか、劣化や欠け等の懸念が課題として挙げられている。高炉スラグ、製鋼スラグ、製鋼スラグ混合製品及び鉄鋼スラグ二次製品については、さまざまな工程において広く活用されており、使用量も多い。目立った課題も挙げられていないが、路盤材の場合の雨水 pHへの影響など、使用場所の特性によっては影響が顕在化する可能性もある。石炭灰関係では、フライアッシュ(非 JIS 灰)については、コンクリート工・本体工・土工に、二次製品については、舗装工とその他に用いられており、材料の性状のばらつきに起因する施工期間を通しての長期の品質確保のほかは特に問題となる事項は挙げられていない。フェロニッケルスラグについては、土工に 5 例となっており、課題はほとんど挙げられていないが、登別漁港の環境共生型構造物に使用した事例につき製作および運搬コストがかかることが課題として挙げられている。貝殻やエコスラグについては、それぞれの特性をふまえた利用実績がある一方で、異臭・飛散問題や生態系影響(安全性)など、材料固有の課題が挙げられている。

以上、港湾施設での材料別実態からは、各リサイクル材料に概ね共通してみられる特徴(課題)として、「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)」であることが分かる。一方、スラグ関係の材料については、適用事例が多く、課題も多く挙げられていないが、その理由は、基準等の整備進展も一因であるが、産業副産物であるリサイクル材料の宿命ともいえる「品質ばらつき」の影響が顕在しにくい状況にあることも寄与していると考えられる。すなわち炉の稼働状況が安定していることに加えて、使用状況において重量や形状の条件を満足すれば、化学的性質の相違があまり問題にならないという点も、現場での施工での材料採用にあたって有利に働くと考えられる。

### (3) 用途別実態に対する考察

表 3-2 のリストを用途別に整理し、全般および個別の用途別にみた特徴や状況について整理した。

用途別状況のまとめを表 3-5 に示す。表の記載内容とその説明は、番号、用途、工程(各用途を、コンクリート工～舗装工と「その他」(藻場、人工砂浜整備など付帯設備館関連に対応させたもの)、該当件数(用途毎のリスト中の該当事例の数の和)、合計数量(リストでは体積・重量・その他の記載が混在しているのでそれぞれを集計)、リサイクル材料(各用途で用いられたリサイクル材料を記載)、長所・有益な点、短所・課題:各事例の本文説明にある情報から抽出して記載、その他備考、の構成となっている。

(1)でも記載したとおり、「藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等」の事例が 10 例と最多である。ただし、これらは港湾整備に付随して行う関連事業であり、港湾整備自体に関するものでは、本体工における「中詰材」、土工における「盛土材、覆土材、載荷盛土材」「埋立材」、舗装工における「路盤材」などが主要な用途となっている。使用数量的には土工関連が 200 万 m<sup>3</sup> を超え、大量に使用されており、サンドコンパクションパイル用材など地盤改良工においてもかなりの数量が使用されている。利用後の状況については、概ね良好であるとの報告が多い一方で、将来に向けての劣化の懸念が課題として挙げられている事例が散見された。

これまでの港湾施設でのリサイクル材料の利用状況を用途別に見てみると、サンドマットやサンドコンパクションパイル用材などの地盤改良工においてはスラグを中心に利用されている事例が多い。また、中詰材については、土砂、スラグ、コンクリート塊、フライアッシュ、貝殻というさまざまなりサイクル材料が使用されている。しかし、多様なリサイクル材料を使用していることからも、品質等のばらつきの発生や、将来の劣化が懸念されるという課題が挙げられている。一方、盛土材、覆土材、載荷盛土材や埋立材という土工関係の用途では、事例数がかなり多く、また、使用量が大きい事例を含んでいるが、材料はスラグと土砂が大半でフライアッシュが 1 例のみ含まれるという状況である。路盤材も、地元の材料を活用する観点も含め、種々のリサイクル材料が活用されている一方で、路盤という使用場所の特性から雨水排水の pH 問題や、異臭(貝殻利用の場合)対策の必要性など、特有の課題が付随する。港湾整備事業に付随する、藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、人工砂浜等への活用はもともとの目的や場所が多様であり、各地の事例 10 例において種々のリサイクル材料が活用されているが、これらの事例は安全面や有効性の実証・試験運用に該当する例が少くない。安全面等の所定の基準を満足しつつ、このような現場における実証例を積み重ねることが、利用の普及拡大には不可欠である。安全面や環境面に関しては、受容するか否かの判断に、理論的な観点のみならず感覚的な部分も多分に影響するため、有用性、安全性が基準を充たしているにもかかわらず適用に至らないケースが多く、関係者の粘り強い取り組みが必要である。

以上、港湾施設での用途別実態からは、各用途においては「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されると考えられる。

表 3-4 材料別実態のまとめ

番号	材料	該当件数	合計数量 (体積) m <sup>3</sup>	合計数量 (重量) トン	数量 (その他)	使用工程	長所・有益な点	短所・課題	その他備考
1	建設発生土	4	212540			土工2、基礎工1、本体工1		性状確認、品質ばらつき、 需要季節調整	
2	浚渫土砂	3	8607			地盤改良工1、土工1、その他1	現時点では問題なし	現時点では問題なし	
3	アスファルトコンクリート塊	2	2217			舗装工2	現時点では問題なし	現時点では問題なし	今後調査予定の案件あり
4	コンクリート塊	3	44542		13個 (1個あたり 22.36t-25.79t)	本体工1、被覆・根固工、消波工1、舗装工1	現時点では問題なし	剥離面基準充足ため改変材追加あり 形状ばらつき(均し)作業効率、比重管理)	
5		0						劣化・腐食・欠け等の懸念	
6	建設汚泥	1	2600			舗装工1	適切な排水・曝気管理により品 質満足	品質(強度)満足度	
7	高炉スラグ	8	686785			土工3、地盤改良工2、コンクリート工1、舗装工 1、その他1	良好	力学特性・地盤特性の経年変化に留意	
8	製鋼スラグ	6	1426800		1箇	地盤改良工1、本体工1、裏込工1、土工1、舗装工 1、その他1	良好、調査中	雨水排水pHへの影響(路盤材)	
9	鉄鋼スラグ混合製品	1		34200		地盤改良工1	良好		
10	鉄鋼スラグ二次製品	9	117762	147816		その他4、土工2、基礎工1、被覆工1、裏込工1	良好。 藻場・生物基盤等として有効に 機能		
11	フライアッシュ(非JIS灰)	3	880	140		コンクリート工1、本体工1、土工1	問題なし	長期の品質確保	
12		0							
13	石灰灰二次製品	3	13680			舗装工2、その他1	良好		
14		0							
15	フェロニッケルスラグ	8	130300.3		84個	土工5、本体工1、被覆工1、その他1	良好、問題なし。	用途や場所によってはコスト(製作・運 搬)が課題となる	
16		0							
17	貝殻	3	700	2102		本体工1、舗装工1、その他1	現状、問題なし。 モニタリング中	重量ばらつき 異臭・飛散への対策	
18	エコスラグ	3	1250	2280		基礎工1、被覆工1、裏込工1	良好、植生回復	生物影響	

表 3-5 用途別実態のまとめ

番号	用途	工程	該当件数 (体積) m <sup>3</sup>	合計数量 (重量)トン	数量 (その他)	リサイクル材	使用目的・意図	長所・有益な点	短所・課題	その他備考
1	コンクリート用細骨材		0							
2	コンクリート用粗骨材	コンクリート工	0							
3	混和剤		2	85	11000	スラグ、FA	廃棄物再利用、コスト削減	良好（施工性、強度）		
4	サンドマット		1	145700		スラグ	軽量スラグ活用	軽量		
5	サンドコンハクショナハイル用材	地盤改良工	4	696700	34200	土砂、スラグ	土砂／スラグの有効活用	良好（せん断角、環境影響等）		
6	深層混合処理固化材		0							
7	捨石	基礎工	3	7070		土砂、スラグ	天然石材の代替、工事スリ石活用	施工上問題なし	スリ石要選別、試験場所確保のうえ 安全性を確認	
8	中筋材	本体工	6	94670		1箇 塊、FA、貝殻	不要物・副産物の活用	現時点では問題なし	品質・重量のばらつき 今後の品質維持（劣化懸念）	
9	被覆石、根固・消波ブロック	被覆・根固工、消波工	4		24000	13個+84個 スラグ、コンクリート塊	地元副産物活用 環境保全型資材	魚類生息、藻場育成	コスト高（製作＆運搬） 劣化懸念	
10	裏込材	裏込・裏埋工	(1) 次項と共通							
11	裏埋材		3	253682	80	スラグ	コスト削減、環境保全型資材	良好		
12	盛土材、覆土材、載荷盛土材	土工	8	822507	310	スラグ、土砂、FA	生産地近傍、過去実績、軽量など 雨水等による固化や膨張等を起 こさない特性	冬季低温地域の凍上抑制効果、 経年変化（力学特性）		
13	埋立材		7	1393500		スラグ、土砂	発生土・副産物の有効利用	良好	需要時期調整	
14	路床盛土材		3	177200		スラグ、土砂、FA	せん断角確保、軽量	良好	強度	
15	路盤材	舗装工	5	46558	2100	コンクリート塊、スラグ、FA A、貝殼	地元材活用	現時点では問題なし	排水pH上昇（スラグ 異臭・飛散対策（ホタテ）	
16	As舗装骨材、Asフィラー材		1	201		コンクリート塊	事前検討をふまえて採用	現時点では問題なし		
17	藻場、浅場・干潟造成、覆砂材、 人工砂浜等	その他	10	29290.3	18	スラグ、土砂、FA、貝殼	試験、実証、効果調査	良好、調査中	生物影響、工法限定	

### 3.1.2. 全国の港湾施設等における石炭灰の利用状況等実態調査

国土交通省の「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」においては、用途別にリサイクル材料に要求される性能や、使用実績等がまとめられており、前年度委託の報告書にその概要を記載している。ここでは「石炭灰」活用の観点に絞って再整理したうえで、前項 3.1.1 の知見もふまえて用途別要求性能、実績等について整理した。

#### (1) コンクリート混和材

要求性能:

- JIS 規定あり
- 品質のばらつきが少なく、作業に適するワーカビリティを有すること
- 硬化後の所要の強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性並びに鋼材を保護する性能などを有すること

石炭灰関連の基準・利用実績・展望等は、以下の通りである。

区分	品質性能	利用実績
フライアッシュ (JIS 灰)	品質基準あり	利用実績あり(限定的)
フライアッシュ(非 JIS 灰)	利用可能、課題あり	利用実績あり(限定的)

JIS 灰フライアッシュは品質基準が設けられ利用実績も認められている。一方、非 JIS 灰フライアッシュは、利用可能である反面、課題等への言及があり今後の検討を要するものとされている。

これまでの港湾施設での利用実績において、非 JIS 灰の活用例 1 例(福島県)があり、コスト削減に寄与しつつ、現状で強度等についての課題は挙げられていない状況であり、今後の活用拡大の可能性が期待される。

今後、福島県以外においても同種の取組を行い、コスト面における優位性を確保しつつ、強度面等についても問題ないことを確認する等、適用実績が蓄積できれば、今後の展望が開けると考えられる。

#### (2) 捨石

要求性能:

- 「港湾工事共通仕様書」に示される品質基準
- 波力影響への安定性、せん断強さ、長期的耐久性等
- 溶出等、周辺環境への配慮も必要

石炭灰は、当該用途対象外とされ、利用実績も挙がっていない。前項の事例中でも石炭灰活用例はない。

なお、これまでの港湾施設での利用実績において、他のリサイクル材料まで視野に入れた場合、建設発生土・鉄鋼スラグ二次製品・エコスラグで 1 例ずつの実績がある。天然石の持つ丸みを帶びた形状等が、副産物そのままで再現できない点が共通の課題であると考えられ、建設発生土活用事例においてもズリ石の性状確認や選別の必要性について課題として挙げられている。

### (3) 中詰材

要求性能：

- ・「港湾工事共通仕様書」に示される品質基準
- ・「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に準拠し、天然の砂・砂利に準じた扱い

石炭灰関連の基準・利用実績・展望等は、以下の通りである。

対象材料	品質性能	利用実績
フライアッシュ(非 JIS 灰)	利用可能、課題あり	利用実績あり(限定的)
クリンカッシュ	利用可能、課題あり	利用実績なし

フライアッシュは、非 JIS 灰を用いセメントなどを添加し、水と混合してスラリ化し、構造物に利用するもので、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が実用化されている。一方、クリンカッシュについては適用技術に係る情報が十分集積されていないことからも利用実績はない現状である。

フライアッシュを利用する場合の利点・留意事項を概観すると以下のとおりである。

#### <利点>

- ・ 流動性向上による作業性の向上、水中部における充填性の優位性、配合量調整による固化条件の選択可、コスト面の優位性、など

#### <留意事項>

- ・ 非 JIS 灰使用のため品質変動を考慮した配合設計が望まれる。
- ・ 重金属溶出管理の必要性

これまでの港湾設備での利用実績において、非 JIS 灰の活用例が 1 例(防波堤工事)ある。当該用途への適用にあたっては、過去の研究成果をもとに実施工に至っており、不具合は確認されていないとしているが、長期の品質確保について課題が挙げられており、調達時の品質のばらつきに留意が必要と考えられる。

#### (4) 被覆石・根固・消波ブロック

要求性能:

- 「港湾工事共通仕様書」に示される品質基準

石炭灰関連の基準・利用実績・展望等は、以下の通りである。

対象材料	品質性能	利用実績
フライアッシュ(非 JIS 灰)	標準材料に準ずる性能	利用実績多い
石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)	標準材料に準ずる性能	利用実績あり(限定的)

石炭灰の非 JIS 灰フライアッシュ及び石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)は標準材料に準ずる性能とされており、利用実績も認められている。

フライアッシュを利用する場合の利点・留意事項を概観すると以下のとおりである。

<利点>

- 緻密な構造体形成(ポゼラン反応)による、長期強度の増進及び耐摩耗性獲得

<留意事項>

- 粘性増大による表面仕上げの困難さ増大。
- 非 JIS 灰使用のため品質変動を考慮した配合設計が望まれる。
- 重金属溶出管理の必要性

当該用途は石炭灰の特性の観点からは、適用に対する有望な面も認められるものの、これまでの港湾設備での利用実績において該当例は挙がっていない。一方、事例がある他のリサイクル材料はスラグ系 3 例、コンクリート塊1例となっており、用途に適した重量が主要な要求事項になっていると考えられる。石炭灰の活用拡充には他材料との組合せ等によって、用途に適した重量確保の方策が必要である。

また、国土交通省の当ガイドライン掲載以外の例ではあるが、他の副産物と組み合わせて、比重の小ささからくるデメリットを克服した実証例が九州地方にあり、このような取り組みを参考に、他地域での適用可否検討等を行うことが必要である。

#### (5) 裏込材・裏埋材

要求性能:

- 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に準拠し、天然の砂・砂利に準じた扱い
- 溶出水の海水への影響や、埋立地内への溶出等にも留意必要

石炭灰関連の基準・利用実績・展望等は、以下の通りである。

対象材料	品質性能	利用実績
フライアッシュ(非 JIS 灰)	利用マニュアル等あり	利用実績多い 裏埋材は限定的
クリンカッシュ	標準材料に準ずる性能	利用実績あり(限定的)
石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)	利用マニュアル等あり	利用実績多い
石炭灰二次製品(石炭灰造粒物)	利用マニュアル等あり	利用実績あり(限定的) 裏込材は利用実績なし

形態の異なる石炭灰毎に、利用マニュアル等が整備されており、利用実績も認められている(クリンカッシュについては、標準材料に準ずる性能と位置付けられている)。

フライアッシュを利用する場合の利点・留意事項を概観すると以下のとおりである。

#### <利点>

- ・ 軽量かつ固化により構造物に対する土圧(常時)の低減。
- ・ 流動性に優れポンプ打設が容易、また、材料分離抵抗性に優れ水中打設が可能
- ・ 早期にダンプ走行も可能なトラフィカビリティの確保。

#### <留意事項>

- ・ 環境安全性についての事前確認(炭種や配合の影響)。
- ・ スラリ性状に及ぼす影響度合いの事前確認

当該用途は石炭灰の品質性能、利用実績の観点からは、適用にあたって有望であると考えられるが、港湾設備での利用実績において該当例は挙がっていない。一方、事例がある他のリサイクル材料はスラグ系 3 例であることからも、前項(被覆石等)と同様、石炭灰活用には重量面の課題の克服が前提となると考えられる。なお、利点の項にあるとおり、所定の重量を充足したうえで、石炭灰の軽量という特性をメリットとして活かせる可能性もあるため、他の材料との適切な配合の吟味・検討が重要である。

材料の持ち合わせる重量面からは、軽すぎても重すぎても使用に適さないため、用途に最適な重量となるような調整が必要であり、配合する他の材料の検討や、石炭灰の性状のばらつきまで留意した配合設計が必要であると考えられる。

## (6) 藻場・浅場・干潟造成、覆砂材、人工海浜等

要求性能:

- ・ 「港湾工事共通仕様書」、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」、「空港土木工事共通使用書」等において規定されている内容に準拠
- ・ 溶出水による海水への影響、近傍に生息する生物への影響、人への健康影響等についても留意が必要

石炭灰関連の基準・利用実績・展望等は、以下の通りである。

対象材料	品質性能	利用実績
クリンカッシュ	利用可能、課題あり	利用実績あり(限定的)
石炭灰二次製品(石炭灰造粒物)	利用マニュアル等あり	利用実績多い

クリンカッシュは用途として利用可能であるものの、課題等も挙げられており、今後の検討を要するものとされている。また、石炭灰二次製品(石炭灰造粒物)は、利用マニュアル等が整備されており、利用実績も認められている。

それぞれの材料の利点・留意事項を概観すると以下のとおりである。

### [クリンカッシュ]

<利点>

- ・ 天然砂と同様の設計方法を使用可能、載荷重の軽減にも貢献

<留意事項>

- ・ 異なる発電所から調達の場合の品質相違(事前の試験等による材料特性等を確認することが望ましい)
- ・ アルカリ水の溶出懸念に対する中和策

### [石炭灰造粒物]

<利点>

- ・ 環境修復材としての活用(新生堆積物のヘドロ化抑制)
- ・ 水質・底質環境改善による生物相回復、軽量性

<留意事項>

- ・ 散布時の海底泥巻き上がりによる濁度上昇

これまでの港湾設備での利用実績において、石炭灰二次製品(石炭灰造粒物)を覆砂材として利用した1例(広島県)がある。適用結果をふまえて海域環境改善手法効果を実証することを目的としており、このような実証例を通じて上記、利点の定量的な検証が行えれば、今後の適用拡大に

資することが期待される。

また、石炭灰の付帯設備への活用は、漁港関連でも実績を重ねつつあることから、それらを総合的に判断して、利用を拡充することが重要である。

## (7) その他

以下の用途については、前年度委託の報告書において有望用途として取り上げていないが、港湾設備での利用実績において石炭灰の利用実績例として挙げられている。今後の石炭灰活用の可能性検討の参考となると考えられるため、実績の概要を、国土交通省のガイドライン記載の要求事項等とあわせて整理する。

### 1) 盛土材、覆土材、載荷盛土材

要求性能：

- ・ 「空港土木工事共通仕様書」「空港土木施設構造設計及び設計例」等に示される品質基準(粒径・塑性指数・修正 CBR)
- ・ 締固め施工の容易性、せん断強さの確保、圧縮性・吸水による膨張性の少なさ
- ・ 溶出や粉じん飛散等、周辺環境への配慮も必要

フライアッシュ(非 JIS 灰)にセメント等を混合した「頑丈土」を破碎して製造した頑丈土破碎材の使用(港の緑化工事事例、沖縄県)が 1 例あり、施工中・施工後とも課題は挙げられていない。

### 2) 路床盛土材

要求性能：

- ・ 「空港土木工事共通仕様書」等に示される品質基準(粒径・塑性指数・修正 CBR)
- ・ 強度や支持力の確保、変形量や吸水による膨張性や強度低下の少なさ
- ・ 溶出や粉じん飛散等、周辺環境への配慮も必要

石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)を臨港道路整備に活用した事例 1 例(福島県が挙がっており、土質・施工とも良好で安定性・耐久性向上という肯定的評価となっている。

### 3) 路盤材

要求性能:

- ・ 「港湾工事共通仕様書」「港湾の施設の技術上の基準・同解説:「空港土木工事共通仕様書」「空港土木施設構造設計及び設計例」等に示される品質基準(粒径・塑性指数・修正 CBR 等)
- ・ 締固め施工の容易性、支持力・耐久性の確保
- ・ 「舗装再生便覧」に、下層路盤材／上層路盤材に区分して、修正 CBR、一軸圧縮強さ、塑性指数(PI)についての基準値が掲載されている。
- ・ 溶出や粉じん飛散等、周辺環境への配慮も必要

石炭灰二次製品(フライアッシュ固化体)を港の船着き場舗装に活用した事例 1 例(福島県)がある。地元石炭灰の有効利用のための試験施工ではあるが、上記、路床盛土材と同様に、土質・施工とも良好との評価である。

### 3.2. 洋上風力発電設備でのリサイクル材料利活用状況・可能性把握調査

洋上風力発電事業に関与する事業者、行政関係者及び有識者等に対して洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を以下の通り実施した。

項目	ヒアリング調査内容	ヒアリング調査対象者
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	これまでの港湾施設等におけるリサイクル材料の施工事例、施工の結果、施工後の課題等	● 国・行政関係者(3.2.1) ● リサイクル材料活用関連有識者(3.3.2) ● 洋上風力発電関連事業者(3.2.3)
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	有望と思われる用途、適用にあたっての各種課題、要望等	● 洋上風力発電施工者(3.2.4)
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	他のリサイクル材料との組合せ等による課題解決可能性	● 秋田県内建設関連事業者(3.2.5) ● 秋田県内石炭灰利用事業者(3.2.6)

#### 3.2.1. 国・行政関係者に対するヒアリング調査

国・行政関係者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-6 に示す。

表 3-6 国・行政関係者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ H25 年時点の実績に基づいてガイドライン(H30/4 月改訂版)に事例を記載。</li> <li>・ 技術適用にあたって設置している技術基準が、「仕様規定」から「性能規定」に移行している。</li> <li>・ 国交省の施策「リサイクルポート構想」では、港湾におけるリサイクル材料の活用にあたって供給側と需要側のマッチングを進めようとしている。</li> <li>・ 能代港で取り扱っているのは、汚染土壤、石炭灰、鉄くずなどであり、石炭灰は安定的な取り扱いになっており、10t×10 台/日、年間 3 万トンが陸送されているが、東日本大震災以降は、セメント利用に充てられている。</li> <li>・ BB 利用という既存の制限がある中で FA を普及させるには実績要。県の公共工事で実績を作ることも考えられる。</li> <li>・ 非舗装臨港道路の砂利敷きの代替や、残土／ヘドロとの混合により埋め立て／埋め戻し材として用地造成に活用もありうる(RD40 との比較検討が必要)。</li> <li>・ 港湾周辺の用地造成の際、残土等に石炭灰を混ぜて土量をふやして埋立材に活用したり、ヘドロと石炭灰を混ぜて埋め戻し材に活用したりすることも考えられる。</li> <li>・ フライアッシュ混合プレキャストコンクリート製品使用基準では秋田県内で製</li> </ul>

	<p>造される JIS A 6201 に規定する II 種フライアッシュ混合コンクリート製品が対象となっている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>秋田県石炭灰リサイクル再生砕石使用基準では秋田県が発注する公共事業で RC-40 の同等品として使用する石炭灰再生砕石が対象となっている。</li> <li>石炭灰再生砕石における有害物質の溶出及び含有量基準等は、現行基準（土壤汚染対策法等）の溶出基準、含有量基準と同値となっている。</li> <li>現行の基準にもとづき、秋田県内の石炭灰活用促進に向けた一定の成果が出ており、施工実績も上がっている。</li> <li>秋田県リサイクル製品認定制度と整合性が取れており現行の 2 つの基準と合わせて、秋田県内の石炭灰活用促進に向けた一定の成果が出ており、施工実績も出ている。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在の港湾におけるリサイクル材適用に関して、今後洋上風力発電現場も対象とするかどうか、再エネ海域法と連動して検討していく。</li> <li>これまで、国内での取り組み（検討含め）が存在しないため、今後の状況によって検討を進める。</li> <li>能代港は、洋上風力の拠点港＋メンテナンスの際に利用される港となるため、今後の洋上風力発電導入により地域貢献に結びつくことが期待される（山形県酒田港はリサイクルポートとして先進的な取組みをしており、参考にするとよい）。</li> <li>能代港はもともと木材流通の拠点として位置づけられていたが、原木からコンテナへと荷姿が移行するなかで、その機能は秋田港へ遷移していった。今後は、洋上風力建設・運用のための拠点港として発展できるとよいと考えている。</li> <li>能代港は洋上風力拠点港と位置づけられるとともに、メンテナンス時の活用も見込まれ、地域貢献が期待される。</li> <li>日本海側4港のリサイクルポート合同勉強会では、非公式ながら洋上風力に関する情報交換もすすみつつある。</li> <li>洗掘防止材としての活用が想定される。</li> <li>基礎部分の魚礁効果・漁業振興に期待する（水産業の将来性の観点からも「獲る漁業」から「育てる漁業」への転換が必要である。）。</li> <li>感覚的な部分も含めて、安全性が担保されることが、受容の前提と考える。</li> <li>海上の場合、石炭灰の「軽さ」を活かせる用途は限定される可能性があるため、利用するためには、軽さの解決のための研究開発を行うことが必要。</li> <li>地盤改良材としての利用可能性は考えられる。（重すぎず軽すぎずというスペックに合致）</li> <li>ネット等にまとめて洗掘防止材としての活用もありうる。かなりのボリュームの消費が見込める。</li> <li>ブロック材の場合、消波ブロックと基礎石といったダブルでの使用も考えられる。</li> <li>現行の基準が洋上風力発電設備への適用の場合に当てはまるのかどうかが不明。</li> <li>秋田県リサイクル製品認定制度と整合性の取れた形で配合率が明確に定められている。配合率に当てはまらない場合でも、合理的な理由が明確に示されることで認められる内容となっている。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	—

その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>促進海域の議論において市は協議会メンバーとして関与する。住民意見のバランスをふまえて対応する。</li> <li>能代港の機能やリサイクルポートの位置づけ(主要品目など)は情勢に応じて変化してきている。</li> <li>事業者には地元貢献を意識してもらいたい。事業者決定のプロセスでも地元企業の参画を評価に反映するよう国に望みたい。</li> <li>重要港湾(秋田・船川・能代)は国、それ以外は県が管理している。港湾内でも国と県で分担管理している</li> </ul>
-----	---

### 3.2.2. リサイクル材料活用関連有識者に対するヒアリング調査

リサイクル材料活用関連有識者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-7 に示す。

表 3-7 リサイクル材料活用関連有識者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本的には、国交省の港湾・空港整備等におけるリサイクルガイドラインと同様の技術仕様、安全性指標等を参考すれば問題ない。</li> <li>山形県酒田市では、裏込材としての利用実績がある(県庁経由で東北地方整備局に確認するとよい)。</li> <li>静岡県清水港駿河湾や富山県の港湾現場では、海底地形の特徴から、沖合方向で突然深くなっているため、港湾を広げづらいため、秋田も海底地形の特徴を確認することが必要。それによって、港湾工事等の実施がそもそも可能かどうかを判断でき、港湾工事の可能性がない場合は、洋上風力発電本体での適用、等に限定的になってしまい(港湾工事での利用促進が図られる必要がある)。</li> <li>「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」は実情として港湾分野での使用がメイン。空港は品質管理が厳しく、リサイクル材の使用はあまり普及していない。</li> <li>埋立てで、非 JIS 灰を用いていることから実績はある、埋立後は港湾関連用地として活用可能。</li> <li>品質のばらつきが大きい点が、リサイクル材全般にいえる課題(使用上の留意点)である。</li> <li>土木用資材として使用する場合、大量の材料を定められた期間に供給することが重要である。</li> <li>瀬戸内海では船の大型化に伴う海底工事等により発生する浚渫土を有効活用し、近隣で発生する鉄鋼スラグと混合し、減少している干潟再生に利用した。</li> <li>海の現場で利用するため、心理的な抵抗感はある(スラグの中から採取したアサリの安全性等)、また、産業廃棄物の名前から抵抗がある。</li> <li>クリンカッシュはコンクリート用細骨材の一部に代替利用されており、防潮堤工事の実績があるが限定的である。</li> </ul>

洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 石炭灰を洋上風力発電現場で利用する場合には、現場（実海域）での適用となるため、適用前に、実海域での試験確認を行うことが必要になると思われる。</li> <li>・ 港湾・空港整備等の状況と大きく異なる点は、港湾整備等の場合は、適用期間が 50 年、洋上風力の場合は、適用期間が 20 年であり、適用期間終了後、洋上風力発電の場合は、撤去作業が必要となり、解体後の用途について、再利用可能かどうか等の安全性確認が必要となることから、そもそもの配合設計検討で、石炭灰の配合比率を下げる等の工夫が必要になる。特に、石炭灰の中でも、非 JIS 灰の利用にあたって、検討が必要。</li> <li>・ 捨石の代替材としての可能性を期待するところはあるものの、現実的には、天然石ならではの自然な形態、別の石とのみ合わせ等が、石炭灰を用いて人工的に製造する場合に創出することは難しい。また、石炭灰の物理的特性としての、磨り減り、圧縮強度、透水性、侵食等、いずれも天然石に勝る可能性は極めて低く、捨石の代替材となるための研究開発は必要（天然石と同じ挙動をするような製造方法、強度発現のための新たな技術開発等）。</li> <li>・ 被覆ブロック、裏込材、消波ブロックとしての適用可能性は高いと思われる。</li> <li>・ 最もよい適用は、コンクリートの材料としての利用と考えられ、コンクリート材料として利用できれば、その他の利用用途での適用可能性があがる。つまり、コンクリート材料として使えるものは使うのが望ましく、地盤材料材など、特殊の製造過程を設ける必要がある用途は、有用性ではクリアできても、経済性でクリアできない可能性が高くなる。</li> <li>・ 適用用途を検討するにあたって、材料の供給、施工性、品質の担保の 3 点を主軸として進めるといい。</li> <li>・ 石炭灰の軽さを生かし適用する、というのは、難しいところがあるものの、重量を稼ぐための設置圧等の検討を行うなど、工夫することは可能。</li> <li>・ 適用用途が、洋上風力発電設備の本体になってしまうと、軽いという特性は生かされない可能性が高いため、付帯設備での適用用途の検討も積極的に行うのがよい。</li> <li>・ 漁業協調関係を切り口とするのがよいのではないか。</li> <li>・ 沖合漁業（五島）、イセエビ漁（銚子）など地域性を念頭に検討すべきである。</li> <li>・ 浮体式の現場でシンカーとして使えば魚礁としての機能は期待でき、量も多く活用できる。</li> <li>・ 水深大の海域に海山のような大規模な構造物を設置する試みも以前あつたかと思うが（安藤・ハザマが主導）、コスト面の課題や地元の既存業者（砕石業など）への配慮などが必要である。</li> <li>・ 「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」では、陸上よりも海上、海中を想定しているため、風車基礎に関して参考にすることができる。</li> <li>・ 捨石と被覆ブロックの需要が見込まれる。</li> <li>・ 洋上風力発電事業には基地港が必要となり、通常の港湾施設よりも高い耐荷重が要求される。耐荷重を向上させるためには地盤改良が必要となり、通常は砂やセメントが地盤改良材として使用される。砂の代替材としてフライアッシュは高価だがセメントよりは安価で経済的優位性がある。</li> </ul>
---------------------------	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎工における捨石にとって必要な機能は長期耐久性と石と石のかみ合わせである(石炭灰で、自然石の特性が出しきれるか不明)。</li> <li>フライアッシュ(JIS 灰)、フライアッシュ(非 JIS 灰)はコンクリート用細骨材の一部(上限 20%)に代替利用されており、被覆ブロック・根固めブロック・消波ブロックへの利用実績が多いことから、洋上風力発電現場での利用可能性もある。</li> <li>基準さえ満たしていれば関係者に納得いただけるというわけでもない。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>ほかの素材との組み合わせ等については、港湾空港技術研究所 構造研究領域長の山路氏に確認すると、全国のスラグの状況なども教えていただける。</li> <li>砂の粒の大きさ(75 ミクロン～2 mm)に鉄鋼スラグを合わせて使用</li> </ul>
その他	—

### 3.2.3. 洋上風力発電関連事業者に対するヒアリング調査

洋上風力発電関連事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-8 に示す。

表 3-8 洋上風力発電関連事業者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸上風車におけるリサイクル材活用としては、北海道稚内地域で、ホタテ貝殻を骨材としてメンテナンス用道路整備に用いた例などがある。</li> <li>「死んだ」(現在、活用されず荒れている)港湾を、この機会に整備し復活させるのも地元貢献につながる。</li> <li>地方の港湾では、湾内路面が非舗装であったり強度不十分であったりする場合もあるので、それらの整備に用いることも考えられる。港の海底部分の補強や地盤改良等が必要なケースもあると思う。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>重金属の溶出などの安全面の懸念が払拭されることが使用の大前提。風力事業者は地元との関係性を重視し、環境影響に関して細心の注意を払っている(たとえば陸上風車でいえば、風車ギア部の油の周辺流出防止に万全を期す等)。</li> <li>石炭灰の処理や加工のために専用プラント等を新たに整備するのでは、コスト的に見合わない。</li> <li>銚子沖の例は、特殊なタイプとして整理するのがよい。</li> <li>本体工のみでは、それほど多くの石炭灰がさばけるわけではないため、周辺施設も合わせて検討することが必要。</li> <li>洗掘防止材としての適用がもっとも可能性があると思われるが、サイズ、厚み等の製造が可能か、適用時に問題がないか等の詳細検討が必要(骨材どうしの噛み合わせの良否等)。ヨーロッパの先行事例に関する文献を参照にして、技術仕様を整理して、国内利用事業者へのヒアリングを行うのがよい。国内では、設計は沿岸技術センター(CDIT)、施工は港湾空港総合技術センター(SCOPE)である</li> <li>石炭灰の「軽さ」を活かす適用先として、風車タワーや浮体式洋上風車を検討できる可能性がある。材料や部品を設置海域まで曳航して組み上げるこ</li> </ul>

	<p>となるので、軽量化は運搬コストの大幅軽減に貢献する。さらにタワーをコンクリートで建設すれば、鉄製のものにくらべて大きくコストダウン可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 秋田での石炭灰産出量が年間 30 万トンのことだが、今後の見通はどうか。もし上記用途での活用が見込める場合、需給量が今後変化しても安定供給のめどがたっていないとならない。今後風力増、石炭火力減のトレンドが想定されるが、需給バランスは大丈夫か。</li> <li>・ 欧州での実証においては当該国も支援している。鉄にくらべて安価であるという経済的合理性を重視しコストダウンの可能性を追求する姿勢である。</li> <li>・ わが国はどうしても安全性の確認が最優先され、実証といえども新規の分野には踏み出しづらい風土がある。コンクリート浮体実証についても、以前 NEDO において安全性が未確立であるとの理由で見送ったケースもある。</li> <li>・ 腐食などへの耐久性のほか、強度面(とくにタワーは風や波の複雑な力を受けるのでさまざまな周波数特性の外力に対する応答の検討が必要)での安全性確保が必要となる。劣化等によりクラックがはいらないことも重要である。</li> <li>・ WFの場合送電ケーブル長が増大し大規模施設とせざるを得ない。地下埋設部分の被覆として石炭灰活用の可能性はあるのではないか。</li> <li>・ 風車基礎の施工方法は海底地盤により大きく異なる。銚子は海底を掘り石を置いた。一方北九州は凹凸が激しいので捨石マウンド・根固め・底盤コンクリートの工法とした。</li> <li>・ その他、藻場。洗掘防止、根固め、浮体への活用、着底式船のための海底への使用なども考えられる。</li> <li>・ 人工藻場としての石炭灰利用実績が進められていることから、漁業共生事業における藻場材料、海藻のみならず魚類や貝類等の水産資源増殖に向けた人工構造物材料としての適用可能性はある。</li> <li>・ 洗掘防止剤や、モノパイルを差し込んだ後の捨石マウントとして利用可能性、また陸にあげるところの被覆材として活用可能性がある。</li> <li>・ 周辺設備としての変電所での利活用や、仮設ヤードなどといった付帯する陸上設備における材料としての利用可能性はある(人工島としての利活用の類似実績があるため)。</li> <li>・ 中詰材(グラウト材の代替)としては、規格の問題等もあることから利用は難しい可能性はある。</li> <li>・ 法令・基準を遵守しているとしても、やはり現場としては安全面の懸念はなかなか払拭し難いものがある。</li> <li>・ 安全性面だけではなく、洋上風力発電設備で使うにあたっての技術仕様(強度等)も検討が必要。</li> <li>・ いずれの用途で利用する場合にも、第一に安全性、従来の砂利やコンクリートと比較して、本当に安価となるのか、コストメリットを見出すことが必要。</li> <li>・ 地元住民等への事業説明を行うにあたって、どのようなものを使うのか、その使うものは環境への影響はないのか等の説明が求められる中で、地元から出てきた材料で、既に地元でも利活用実績がある(JCOAL の実証試験だけではなく、地元の石炭灰利用事業者が既に製造・現場適用等を行っている)リサイクル資材を活用するということは、製造時の環境影響や、現地への搬入に伴う環境影響等を最小化することになり、地元への環境配慮面に関する説明材料となる。</li> </ul>
--	---

	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後の具体的な事業計画策定にあたって、漁業共生事業は必ず組み込まれるため、そこでの石炭灰利用可能性について盛り込んでいくことなどは可能。</li> <li>従来地元エネルギーと新たなエネルギーとしての再エネとのリンクによるCO<sub>2</sub>排出量の削減や、地産地消の推進や、地元産業振興、漁業振興等のメリットを見出す点については、連携していきたい。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>銚子ではリサイクル材として小名浜から調達した銅スラグを、鉄筋コンクリート製ケーソン基礎に用いている。</li> </ul>
その他	—

### 3.2.4. 洋上風力発電施工者に対するヒアリング調査

洋上風力発電施工者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-9 に示す。

表 3-9 洋上風力発電施工者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭灰活用に向けて長らく取り組んでおり、被覆材、裏込材、盛土材、地盤改良材等での適用事例がある(近年の事例はあまりなく、15年前ぐらいまでがメイン)</li> <li>以降は石炭灰の活用先を苦労して見出すインセンティブが欠けていることも一因と思っている。</li> <li>JCOAL 作成の港湾工事における石炭灰ガイドラインを、土木学会で令和元年度内に「石炭灰ガイドライン」を策定し公開される予定で、一定のオーバーライズがされることから、利用拡大の可能性はある。また、新たな用途としての洋上風力発電設備での利用可能性が高まる可能性がある。</li> <li>洋上風力を建設にあたり、陸地側で部品を組み立てる地組ヤードが必要となる。既存の港を使えれば良いが、通常の入出港業務で余力がない場合があり、その際は、新たに地組ヤードを建設することになる。この地組ヤード建設にあたって、再度取り壊すことも想定すると、石炭灰はこのような港湾埋め立てに適している。</li> <li>臨海部立地の火力発電所で冷却水循環施設の埋戻し用に試行したことがある。</li> <li>配管浮き上がりや性状の不安定さ等により思わしい結果とはならなかった。</li> <li>港湾設備の岸壁部分は背後の陸側の土圧に耐えられる強度をもった部材が必要であるが、陸側の土に石炭灰を混ぜることにより荷重が低減されるので、岸壁部材の使用が削減できる可能性がある。</li> <li>約 30 年前、北海道室蘭湾の白鳥大橋建設時に人工島建設を行う際に、火山灰と石炭灰のブレンドが採用された(その際、北海道開発土木研究所の関与があった(行政)ことが新たな取り組みのきっかけとなった(10万 m<sup>3</sup>)、また、人工島建設は、テンポラリーなものであるが、非常に成果が優れていたため、今も残っており利活用されている)。</li> <li>技術的なところはある程度クリアされているが、石炭灰等廃棄物の再利用に対する関係者理解に対するハードルは高い。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に、港湾現場でも、再生碎石を活用するにあたって、用途・品質にもよるが、利用までのハードルは高かった。それを改善するためには、一部利活用をテスト的に行い、そこから実用化に向けた取り組みが開始した。</li> <li>路盤材も、コンクリート碎石との組み合わせで強度クリアが出来る、あるいは、土木現場での適用基準をクリアできるのであれば、有望。</li> <li>港の拡張にあたって、土木資材としての利活用できるシチュエーションがあるが、他の材料との組み合わせがあると有望。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>「軽さ」をメリットにできる使い道はなかなか見つけづらい。</li> <li>裏込材などへの適用により、土圧を軽減できる点は利点となる可能性はある。</li> <li>碎石の場合、人頭大サイズが必要になるが、そのまま石炭灰に置き換えると比重が低く、大容量が必要となり、製造コスト増、また、碎石を入れる袋製作も必要になる等、コスト増が懸念される。</li> <li>「軽さ」を解決すべく、石炭灰をマット状に広い面積を確保し、総量で軽さをカバーするのが良い(新たな形状での捨石代替)。ただし、碎石のように事前の作りおき等保管場所の確保が課題。</li> <li>技術的観点にくわえ、社会的課題として、石炭灰で代替され販路が縮小する既存の地元碎石業者等の関係にも留意すべきである。</li> <li>これまで陸域での石炭灰利用での実績があるが、今後、洋上風力現場で適用するにあたっては、陸域での各種データが、海域でも採用可能かどうか検証する必要がある。必要に応じて、海での利用技術の開発が必要と考えている(現在は、単独で、対象フィールドを海域に広げる取り組み開始している)。</li> <li>洋上風力建設船(SEP 船)に 500 億円投資し、洋上風力市場に参入していく予定。</li> <li>一方、土木建設の面でも億単位の技術開発を行う予定であるが、長年石炭灰の資材化に取組んでおり、近年は東北電力と共同で石炭灰の再生資材化について取組んできた(大規模工事として、石炭灰を再利用している(白鳥大橋))。</li> <li>清水建設は技術、体制を整えた状況だが、秋田県、漁協、地元などとのコミュニケーションが不足している。</li> <li>重量については、耐久性との兼ね合いもあり、必ずしも軽い(または重い)ほうが良いと言い切れるものではない。適切な重量に調節可能であることがもつとも有用である。特に、軽くすると弾性係数等に影響し、強度面での課題が増える懸念は否めない。</li> <li>耐久性について:コンクリートとしての耐久性は 100 年レベルであって、風車の場合はナセル部分など他の部分の耐用年数(20 年想定)で、機器としての使用期間が規定されることになる。</li> <li>100~200 年のスパンでみると海水中の塩分が徐々に浸透はしてゆく。一方でコンクリートからの微量成分溶出はないと考えてよい。</li> <li>浮体として使う場合の特徴的な留意点:「周縁部の材質の水密性の高さ」が要求される。浮かせるためには内部の空気が抜けないようにする必要がある。強度でいうと通常 <math>240\text{kg/cm}^2</math> 程度のところを <math>800\sim1000\text{ kg/cm}^2</math> が要求される。</li> <li>基本的性質でいえば、FA は塩素に強いため海水中や臨海部の用途に向いている。天然(火山起源)生成ではあるが、ローマ時代の建造物が現存し</li> </ul>

	<p>ているのも一例であるし、小樽港の北防波堤にも道内火山の灰を活用しており 100 年の耐久を見込んでいる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 塩分に強い理由は、水酸化カルシウムと石炭灰中の珪素との反応(ポゾラン反応)や、海水中の塩素以外のナトリウムやカリウムが石炭灰成分と反応などにより、緻密な構造が形成されるためである。それが塩素の浸入をくいとめて「拡散停止」状況になる。</li> <li>・ 普通セメントにくらべてコンクリートとして硬化に要する時間が長い。通常であれば前日に処理したものが翌朝には十分な強度となっており、製造施設は日単位の稼動計画が立てられる。FA の場合、通常セメントとの置換率(10~15%が多い)にもよるが、硬化時間が延びることにより、上記の1日サイクルに載らなくなるので、実質的に施設の稼働率に大きく響いてくる。</li> <li>・ 石炭灰中の未燃の C(炭素)の除去が不完全かつ、品質が一定しないことによる弊害もある。寒冷地使用での凍結防止対策の際、残存するCが多いどうまいかない。未燃Cの量は低めで安定していることが望ましいが、「調整電源」として毎回、稼動させる状況が異なる火力発電所からの副産物であることもあり、品質管理が困難であることも理解はしている。</li> <li>・ 「品質不安定」「比重小」「安全性確保」の 3 課題克服が必要で、活用は限定的とならざるを得ない。とくに品質面がネックとなる。</li> <li>・ 長期にわたる安全性等の確保と、事業者の立場での短期施工・性能発揮との折り合いをつける必要がある。</li> <li>・ グラウト充填用は考えられるが将来性があるとは言い難い。</li> <li>・ 洗掘防止材の利用では、比重小のデメリットが効いてしまう。</li> <li>・ 石炭灰の調達コスト(材料費)が有利であっても、コストが大きいのは施工費であり、施工時に通常以上の手間を要し追加コストがかかるのでは、見合わない。</li> <li>・ 渔業共生も可能性はあるが、石炭灰利用が必須ではないことから、コスト比較等の観点から利用推進が実現するかどうかを決めると思われる。</li> <li>・ 発想を転換し、石炭灰使用によって高価な部材の削減が可能となる途を追求してはどうか。土圧の低減による岸壁部材の削減が一例。</li> <li>・ 裏込材は軽くてもよいため、石炭灰そのものだけでも使える可能性はある。</li> <li>・ 洗掘防止剤としての適用可能性がある。</li> <li>・ 洋上風力発電計画を進める上で、発電機、周辺施設についての検討も必要であるが、港湾整備(増設、補強等)の拡充が重要。海外では、基地港としての機能と物流港としての機能を併せ持つ、その上で、洋上風力発電の建設計画が進行している。洋上風力を建設する場合には、その機材の受入れ設備、工事材料の受入れ設備などを含めて港湾設備をかなり規模を拡大する必要がある。このような港湾設備の拡充まで考慮するとなると、石炭灰の利活用が確実に必要となる。</li> <li>・ 港湾拡大において、海側を拡大する場合は、埠頭を造る必要があり、そのための資材として石炭灰の利活用可能性がある。</li> <li>・ 港湾拡大において、陸側を拡大する場合には、荒廃地利用の観点で、舗装、地盤改良の現場での石炭灰の利活用可能性がある。</li> <li>・ 人工島の中詰材として利用する場合には、通常の材料(砂等)であると、中詰材を補強する管の材質を強度が高いものにするなどしなければならないが(材質がゆがむため)、石炭灰スラリの場合は、内部で固まる性質を持つことから管の材質を必ずしも強度が高いものにしなくともよい。</li> </ul>
--	---

	<ul style="list-style-type: none"> <li>例えば、盛土では、山砂と混ぜて山砂の混合率を下げつつも、かつ、強度・密度がクリアできるならば有望と考えられる。</li> <li>地盤改良工での利活用可能性もある。その際、すべて置き換えではなく、一部、砂利の代替あるいは砂利とのブレンドでの利活用が可能であればよい。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>同社製品「HCB-F」は、石炭灰主体で、セメントや繊維、ベントナイトを混合したもので高い遮水効果を有し、既に使用実績がある。特殊素材活用のため、コストは嵩むが、この製品で通常の石炭灰などを覆うことにより、海中への溶出をふせぎ安全性を担保する可能性は見出せる。また用途によって高い遮水性能求めない場合には、配合変更等(ベントナイトを混合しない等)で、製造コストを抑えることができる。</li> <li>新規の試みとして、フライアッシュとセメントを粉体のまま混合し、使用時に水中に沈めて固化させることを研究中で、製造コスト(原材料費だけでなく加工の手間も)削減となり、かつ、粉体の灰とセメントの混合は均質にしやすく品質安定化につながる。課題としては、使用開始時は固化がすすんでいないのでその時点の微量元素の溶出をどう防ぐか(入れておく袋の材質検討など)等とくに安全性上の留意点となる。</li> <li>トラス構造に「高炉スラグ混和高耐久コンクリート」を用いたのは、設置場所(博多湾)近傍において入手が容易であったことにくわえ、「商品」として品質管理がなされていたことも考慮した。</li> <li>松浦火力のFAも検討候補に挙がったが、品質面での懸念が払拭しきれず採用しなかった。</li> <li>前述のとおり、火力発電所の稼動条件によりFAの品質がばらつく(地域差があるうえに、同一施設でも稼働状況で変化する)のは宿命的なことである。後処理でCの除去など品質管理を行って「商品」化するか、手間をかけず、ばらつきを許容したうえでの活用を主眼とするか、方針により対応が異なってくる。高炉スラグの場合は、安定操業がそもそも本業(銑鉄生産)の必須条件となるので、そのような悩みは生じない。スラグ使用がFAより普及しているのは、基準等の整備状況の相違にくわえてこのような品質的な安定性の相違も寄与している可能性もある。</li> <li>重力式の場合の中詰材としても、スラグのほうがよく用いられる(石炭灰は軽いため利用されないと思われる)。</li> <li>造粒材そのものの利活用は難しいことから、他の材料との組み合わせが可能性としてある。</li> <li>秋田県の場合は、DOWA グループ(小坂精錬)がリサイクル事業を推進しており、こことのタイアップも重要。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>清水建設が保有する技術(洋上風力関連、石炭灰関連)について、地元との繋がりが足りないため、間を取り持つて欲しい。洋上風力発電に関しては、既に事業者候補が確定していることなども踏まえ、まずは、石炭灰の再利用という側面で秋田県と係われればと思っている(あくまで入り口は石炭灰であるが、最終的には風力にも絡めれば良いと思っている)。</li> <li>行政としての仕様に盛り込んでもらうことが利活用促進の一環の道であり、発注の際の総合評価で加点するような仕組みを行政が盛り込むことが重要。</li> <li>再エネ推進とあわせて、環境負荷面でのメリット等を行政の仕様に盛り込むことがあると、石炭灰利用も加速する可能性がある。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>行政の仕様の中では、具体的なスペックや県産品のリサイクル(地産地消)等を盛り込むと、石炭灰利用も加速する可能性がある。</li> <li>行政が明確なスペックや強度、安全性基準等を設け、事業者/ゼネコンがそれぞれクリアするための技術開発等に取り組むと良い。</li> <li>洋上風力現場での石炭灰利用に関しては、地域貢献、共存協業が重要であり、地元の雇用促進につながれば、今後、地元の石炭灰利用企業等も新たな分野への参画が見込まれる。</li> </ul>
--	--

### 3.2.5. 秋田県内建設関連事業者に対するヒアリング調査

秋田県内建設関連事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-10 に示す。

表 3-10 秋田県内建設関連事業者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>国交省では BB(高炉セメント) 指定であるが、秋田県内においては、フライアッシュ混合コンクリートも同等品として認めて欲しい。</li> <li>フライアッシュ混合コンクリートは冬期の強度低下が心配されているが、打設後の 12 時間をしっかりと養生すれば普通セメントと同等の強度を確保できる。</li> <li>フライアッシュ混合コンクリートは、乾燥収縮ひずみが小さくなることから高炉コンクリートのひび割れの発生率減少につながる</li> <li>明石大橋などでの利用実績もあり、橋脚の止水材としての利活用の可能性がある。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭灰は比重が 1 以下と小さいため、重量を必要とする本体支持建造物には不向き。</li> <li>技術的には現行の規格・基準のままでも十分適用可能と考えられる。</li> <li>消波ブロック、藻場キューブの利活用可能性がある(すでに製造・施工実績があるため、それを洋上風力現場で適用することができる)。</li> <li>変電所内の防草対策として、クリンカアッシュ活用がある(すでに製造・施工実績があるため、それを洋上風力現場で適用することができる)。</li> <li>コンクリートの混和材として使用した場合、石炭灰のポゾラン反応により緻密なコンクリートとなるので、水密性、遮塞性が向上し耐久性が増すので各使用箇所でも有効(陸上風力現場での適用実績もある)。</li> <li>洋上風力発電設備に使用する生コンクリートとして、塩害に強く、海水の作用を受けにくいフライアッシュ混合コンクリートが最適。</li> <li>裏込、洗掘防止剤、汚濁防止沈降剤、コンクリート混和剤等への利用が可能。</li> <li>サンドコンパクションパイルの砂としての可能性がある。</li> <li>洋上風力発電事業現場(港湾施設等)で石炭灰を調達し製作を行う場合の産業廃棄物利用に係る許認可等について検討が必要。</li> <li>従来製品と同等、あるいは同等以上の性能が見出せる場合には、地元の材料を取り扱うことで、材料費が下がることによる経済性メリットを見出せる可能性がある、かつ、地元の産業廃棄物活用を通じた産業振興にもつながる。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>経済性の面では逆有償であれば有利となることや、輸送距離の問題等もあることから、本当に経済的メリットが見出せるか試算が必要。</li> <li>新たな適用場所ということもあり、安全性面で現状の基準(土対法等)のクリアだけで十分といえるか、安全性面でクリアした場合にも、現地住民や関連産業関係者(漁業関係者ほか)の合意等、安心確保等の検証は必要。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>比重アップに向けて、鉄鋼スラグと石炭灰のハイブリット利用、IGCC 溶融スラグと石炭灰のハイブリット利用、銅スラグの活用可能性がある。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の公共工事の仕様でも、県と同じく地域限定も含めた仕様設定が必要(普及につながる)。</li> <li>コンクリート製品への石炭灰混合が高まることで、石炭灰利用量が増加するため、取り扱う際の製造現場整備にあたっての初期コスト(輸送コスト、サイロの設置費用等)について助成制度が必要。</li> <li>県内の利用用途拡大に向けて、県の部署を超えた公共工事への品目指定が必要。</li> </ul>

### 3.2.6. 秋田県内石炭灰利用事業者に対するヒアリング調査

秋田県内石炭灰利用事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した。結果を表 3-11 に示す。

表 3-11 秋田県内石炭灰利用事業者へのヒアリング調査結果

項目	ヒアリング結果
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>国(国交省)や県として FA 指定の仕様を増やすほしい。現状、能代山本地区では高炉セメント B 種(以下 BB)代替として FA が指定されているが、他では BB(夏は BB、他季は N)などで FA が挙げられていない。</li> <li>BB は性能もよいし、海洋での適用にもふさわしいと思われるものの、今後この BB 代替としての FA 適用を行いたい。</li> <li>FA の良さの周知が不十分であることにくわえ、先入観も含んだデメリットを意識して敬遠されがちなきらいがある。この状況を逆転させる必要あり。</li> <li>FA 指定の仕様を増やすことと並行して、コンクリートに混合した場合の性能確認も重要。</li> <li>フライアッシュ(JIS II 種灰)混合コンクリートは、コンクリート混和材として使用した場合の混合割合は用途により 10~50%を達成しており、製造ラインも、サイロと軽量機を直接連結させることにより、効率的な設計となっている。</li> <li>能代山本地域においてフライアッシュ混合コンクリートは平成 22 年より県発注工事での使用が標準化されている。</li> <li>作業性の向上、耐久性の向上、発熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制等、コンクリートと合わせた場合、高炉スラグに比べてひび割れが入りにくいという特性が施工結果からも得られている。</li> <li>フライアッシュ(JIS II 種灰)混合コンクリートを用いたプレキャストコンクリート製品及びフライアッシュ再生砕石は秋田県の認定リサイクル製品として登録されており、県の発注工事で優先的に使用されている。</li> <li>JIS 灰以外のフライアッシュを活用した路盤材の製造も開始されており、能代・山本地域を中心に出荷・施工実績がある。</li> <li>採石場との競争があり、価格競争の問題がある。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>FRC の長所である保水性と透水性を利用して土地造成への利用を検討している。盛土材であれば碎石業者との軋轢がなくなる。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>県の施設・管理エリアでケーソンや消波ブロック等としての実証を行ってはどうか。</li> <li>コンクリート製品の主な劣化要因である①中性化②凍結融解③塩害④アルカリ骨材反応に対して FA が有効である特性を生かすことでの活用可能性がある。</li> <li>石炭灰の未燃カーボンによるAE 剤の吸着、未燃カーボン量の変動等の問題が残されている。</li> <li>石炭灰利用によるコスト軽減、かつ、高耐久品質保持という特性を生かし、広範囲の製品に対応可能(代替可能)。</li> <li>強度の高い(25N)FRC を利用することが必要。</li> <li>石炭灰の比重が小さい(軽い)ことを、どのように解決するか検討が必要。</li> <li>FRC の技術を発展させ、藻場礁の試験実績があり、効果検証が期待される。</li> <li>藻場礁の実用化にあたっては特に、型枠、蒸気養生庫等の製造現場での大幅変更が必要である。また、工場製品に馴染む藻場礁を考案し、他社のブロックにない機能の付加(形状など)が望まれるが、その場合、製造コスト増になる可能性がある。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	—
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>リサイクルポートとしての能代港の整備進展に期待している。</li> <li>エコタウンは、現在は SDGs の位置づけとして理解が進もうとしている。</li> <li>これまでの県内での施工実績等を受け、新たに、フライアッシュ入り生コンクリート製造施設を導入しようとしている事業者がある。</li> <li>利用事業者の立場としては、施工状況等を、県、地方振興局等に対して逐次現状報告を行うと共に、国等に対する要望書を提出する等して、県内の活用促進になるよう働きかけを進めている。</li> <li>国の仕様書に明記されることが重要なため、今後も継続して働きかけを行う。</li> <li>土木学会等のガイドラインの策定等により、販路拡大を図ることが必要。</li> </ul>

### 3.3. 代替材料としての石炭灰利用可能性評価

3.2 で整理したヒアリング調査結果について、ヒアリング調査対象者別に、現状課題と対応策について整理した。

### 3.3.1. 国・行政関係者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

国・行政関係者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-12 に示す。

表 3-12 国・行政関係者の立場から見た石炭灰利用の現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>全国の港湾でのリサイクル材利用実績はある。</li> <li>適用にあたって、性能規定に移行している。仕様や品目で限定されないので、石炭灰活用の観点で悪い方向性ではない。</li> <li>利用可能性として、非舗装道路での砂利敷代替や、埋立／梅戻り材としての活用可能性もある。</li> <li>秋田県内では、現行の基準に基づき、県内基準を定め、優先的にフライアッシュ混合製品を利用できており、一定の成果・施工実績もあがっている。</li> <li>秋田県リサイクル製品認定制度との整合性も取れており、一定の成果・施工実績も上がっている。</li> <li>行政としての基準設定、制度構築は一定程度行えている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後の利用拡大に向けては、公共工事等での実績を増やすことにより、性能を明確にすることが必要。</li> <li>実績を増やすことにより、指定品目に追加してもらえるよう働きかけも必要。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内での取り組みが皆無であることからも、今後の状況によって国の対応法も変わらが、再エネ海域利用法と連動して検討していく。</li> <li>リサイクルポート合同勉強会のように、各地域で連携して情報を共有し、特性を活かせるような検討も必要。実証事例も各地の取り組みを集約する。</li> <li>地盤改良材、洗堀防止材、ブロック材としての利用可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取り組み事例がないことからも、具体的な取り組みを実証試験として行い、各種データを取得することが必要。</li> <li>現行の基準が洋上風力発電設備への適用の場合に当てはまるかどうか、適用によるデータ取得等が必要。</li> <li>取得データを基にした、配合率等を定め、洋上風力発電設備での石炭灰利用に関する基準設定が必要。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	—	—
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>リサイクルポートとしての指定はあるが、今後の洋上風力発電導入によって位置づけも変わってくる可能性もある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>メンテナンス等含め具体的な地元での雇用創出等につながるような構想が必要。</li> </ul>

### 3.3.2. リサイクル材料活用関連有識者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

リサイクル材料活用関連有識者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-13 に示す。

表 3-13 リサイクル材料活用関連有識者の立場から見た石炭灰利用の現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 国交省の「港湾・空港整備等におけるリサイクルガイドライン」と同様の技術仕様、安全性指標等を参照すれば問題ない。</li> <li>・ 裏込材としての利用実績がある。</li> <li>・ 「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」を参考に、港湾分野では、リサイクル材料の使用実績はある。</li> <li>・ 品質のばらつき、大量材料を工期内に供給できるか、等の問題がある。</li> <li>・ 安全性面で基準をクリアしていくも、心理的な抵抗がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 石炭灰の利用は、他の産業廃棄物と比較して少なく、ガイドライン・マニュアル等の整備も現在進行形のところがあるため、今後の利用実績増に向けた取り組みが必要。</li> <li>・ 本格的な利用(事業化)にあたって、品質のばらつきを考慮しても採用となるか、大量の材料を供給できる仕組みが整っているか等サプライチェーンの構築が必要。</li> <li>・ 安全性面での心理的な抵抗をどこまでぬぐい切れるか、等も検討が必要。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 被覆ブロック、裏込材、消波ブロックとしての適用可能性は高い。</li> <li>・ 最も利用件数が多いコンクリート材料としての利用が可能となれば、他の用途での利用可能性が高まる。</li> <li>・ 地盤材料等、特殊の製造過程を必要とする用途は、経済性面でクリアできない可能性もある。</li> <li>・ 漁業協調の切り口からの用途(藻場礁、魚礁等)が実現可能性は高い。特に今後着床式のみならず、浮体式洋上風力の導入が開始された場合には、シンカーとして利用することは量も多く活用できる可能性が高い。</li> <li>・ 海域現場での適用であるため、適用現場特有の事情に配慮した配合設計が求められる可能性が高い。</li> <li>・ 捨石代替としての可能性は高いと思われる。ただし、天然石特有の形状等を人工的に製造することの難しさが課題である(石炭灰</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コンクリート材料としての利用可能性を検証することが必要。</li> <li>・ 適用用途での技術面でのクリアに加えて、経済性面での試算が必要。</li> <li>・ 現場適用前に、実海域での試験確認を行う必要がある。</li> <li>・ 石炭灰の人工石製造に関する検討を行うことが必要。</li> <li>・ 捨石として利用可能かどうかの検証が必要。</li> <li>・ 安全性面で、基準クリアだけでは難しい部分をどのように解決していくか検討が必要。</li> </ul>

	<p>以外のリサイクル材料でも同様の問題が残されている)。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>現時点では、「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」を参考にして、適用可能性を決定することが望ましい。</li> <li>捨石と被覆ブロックとしての需要が見込まれるが、捨石として自然石同等の効果を出せるかどうかが課題である。</li> <li>基地港整備時に、地盤改良材のセメント代替として活用することで経済的優位性がある。</li> <li>コンクリート用細骨材の一部(上限 20%)に代替利用されており、被覆ブロック・根固めブロック・消波ブロックへの利用実績が多いことから、洋上風力発電現場での利用可能性もある。</li> </ul>	
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>スラグとの組み合わせによる利用可能性はある(重量対策のため)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄鋼スラグとの混合による施工実績があるが、産業廃棄物の組み合わせによる施工が受け入れられるかどうか検討が必要。</li> </ul>

### 3.3.3. 洋上風力発電関連事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

洋上風力発電関連事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-14 に示す。

表 3-14 洋上風力発電関連事業者の立場から見た石炭灰利用の現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去の事例で、陸上風車との組み合わせでメンテナンス用道路整備にリサイクル材としてホタテ貝殻を骨材として利用した実績がある。</li> <li>港湾では、湾内道路が非舗装である場合などがあり、そこでの利活用、地盤改良等にリサイクル材を活用することが有効となる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>港湾の中でも、海域のみならず、未整備の道路等にリサイクル材を活用することもリサイクル材利活用促進につながる可能性がある。地元貢献の観点からも、対象を広く捉えると使途が見えてくる可能性がある。</li> <li>そのためには、テスト施工による性能評価等を行い、その結果を基に、国・行政等に働きかけることが必要。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>本体工のみでなく、周辺施設も合わせたうえでは、洗堀防止材、藻場、根固め・被覆ブロック等と</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>洗堀防止材としての利用にあたっては、サイズ、厚み、骨材同士のかみ合わせ等が可能であるか等、他国の事例等から技術仕様</li> </ul>

	<p>しての利用や送電ケーブルの被覆としての利用可能性はある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軽さを生かすことで運搬コスト低減にもつながるため検討の余地はある。</li> <li>・ 漁業共生事業における藻場材料、人工構造物材料としての適用可能性はある。</li> <li>・ 洗堀防止材や、捨石代替材としての利用可能性はある。</li> <li>・ 周辺設備としての変電所、仮設ヤード等陸上設備における材料としての利用可能性はある。</li> <li>・ 安全面は法令・基準の遵守だけではぬぐいきれないところがある。</li> </ul>	<p>を整理し、石炭灰利用事業者による実現可能性確認が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 腐食などへの耐久性、強度、安全性確保などが必要なため、検証が必要である(ただし、国内利用の場合、安全性第一という考えが立つこともあり、一方、安全性が成り立っても新規用途での適用になりえないもある)</li> <li>・ 石炭灰を利用する場合に需給バランスが取れるのか、安定供給の問題がクリアできるのか試算が必要。量的なバランスのみならず、需給の時期のマッチングも必要。さらに質的なばらつきの許容範囲にも留意する。</li> <li>・ 安全面は、法令・基準のクリアに加えて、地元での実績・成果等を示すことで、地元の理解を促すことが必要。</li> <li>・ 安全面クリアの後、従来材料と比べた場合のコストメリット、技術仕様を示すことが必要。</li> <li>・ 地元にとって、従来エネルギーと、新たなエネルギーのリンクにより、CO<sub>2</sub>排出量削減、地産地消、地元産業振興、漁業振興等を明確に示すことができるが必須。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 銚子では、小名浜から調達した銅スラグを鉄筋コンクリート製ケーラン基礎の中詰材として利用している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ただし、銚子に関しては、特殊形式であることからも、現在秋田県で計画されている洋上風力とは別に検討が必要。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海外での施工事例として、スペイン、ドイツでコンクリート施工事例がある。</li> <li>・ 浮体式洋上風力現場でのコンクリート施工事例がある。</li> <li>・ 将来、浮体が主体となった場合、現場までの運搬距離の増大が見込まれる。運搬コスト低減策として石炭灰の軽量性のメリットが活かせる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 形式は異なるが、今後の調査対象事例とする必要がある。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本でも NEDO 実証研究で浮体への適用が検討されはじめている。</li> </ul>	
--	---	--

### 3.3.4. 洋上風力発電施工者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

洋上風力発電施工者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-15 に示す。

表 3-15 洋上風力発電施工者の立場から見た石炭灰利用の現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に、港湾の現場で被覆材、裏込材、盛土材、地盤改良材、埋め戻し材等での利用実績がある。</li> <li>港湾の岸壁利用のうち、陸側で石炭灰を利用した場合は、過重低減効果により、岸壁部材の使用削減につながる可能性がある。</li> <li>火山灰と石炭灰のブレンドによる人工島建設実績があるが、地元行政の後押しがあり実現に至った。</li> <li>過去に港湾現場における再生砕石の利用実績もある。</li> <li>港の拡張における土木資材としての利活用可能性はあるが、その場合には、強度が求められるところからも、他の材料との組み合わせがあると有望となりうる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去のリサイクル材料適用事例について整理し、解決すべき課題等がある場合はその対応を行う必要がある。</li> <li>技術的な面ではある程度クリアされており、実績も限定的にはあるが、実績をつくるためには利活用をテスト的に行うきっかけが必要。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽さをメリットにできる可能性は低いが、重いことが良いとは言い切れないため、適切な重量調整が求められる。</li> <li>陸域での石炭灰利用実績で得られた各種データが、海域でも採用可能といえるかが重要である。</li> <li>海水中の塩分が浸透するため、それに耐えうる耐久性が求められるが、FA は塩素に強いため、利用可能性が高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海域でのデータ取得後、技術課題等を洗い出し、必要に応じて技術開発を行うことが必要。</li> <li>石炭灰を利用する場合、置換率によって製造時間に及ぼす影響が明らかになるため、用途・配合例を基に、コスト試算を行うことが必要。</li> <li>例えば、石炭灰利用によって高価な部材の削減が可能となる可能性を追求する検討が必要。</li> <li>利活用を促進するためには、一部でも置き換えるテストにより実</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>硬化に時間がかかるため、施工計画に影響を及ぼす可能性がある。</li> <li>「品質不安定」「比重小」「安全性確保」の3課題をクリアできることが重要。</li> <li>石炭灰単体で従来材料を全量置き換えて利用可能性のある用途と、一部置き換えて利用可能性のある用途がある。用途としては、裏込材、洗堀防止剤が有望。</li> <li>港湾整備における石炭灰利用可能性があるが、港湾整備の具体的な内容によって、利用用途が変わってくる。</li> <li>港湾拡大においても、海側拡大の場合は、埠頭が利用先になり、陸側拡大の場合は、舗装・地盤改良が利用先となる。</li> <li>人工島建設等の場合は、中詰材としての利用可能性がある。</li> <li>盛土としての利用可能性においては、山砂との混合率次第で強度・密度がクリアできれば有望。</li> </ul>	<p>績をつくり、置き換え率を高めていく等が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>港湾整備において、可能性のある用途はあるものの、具体的にどのような配合で製造が行え、その結果として、求められる強度・密度がクリアできるかどうかの検討が必要。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>重力式の場合は、中詰材としてスラグ利用可能性が高い。</li> <li>高炉スラグ利用の際に、品質管理がされている特徴から採用にいたった経緯がある。</li> <li>石炭灰単体での利活用が難しい可能性もある(比重が小さいこと等)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>スラグとの混合の可能性を検討することが必要。</li> <li>品質不安定に起因する「課題」を解決することが必要。元々の品質のばらつき自体は石炭灰の発生の現状から、不可避であることから、後処理を行った上で品質管理を行う、あるいは、品質のばらつきも含めた形での活用となるか、の方針検討を石炭灰業界全体として検討することが必要。</li> <li>他の材料との組み合わせの検討・テスト施工が必要。ただし、他の材料との組み合わせの場合、技術仕様のみならず、他の材料の運搬コスト等を考慮しトータルでの低コスト化が図れることも含め検討が必要。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>発注工事における仕様で、リサイクル推進や環境負荷面でのメリッ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ただし、その際、どのようなスペック、安全性基準であれば、評価項目加点に該当するか、さらに</li> </ul>

	ト、地域貢献等についての評価項目があることが望ましい。	地域貢献についても具体的にどのようなことが加点対象となるのか、具体的な数値・内容を算出することが必要。
--	-----------------------------	---

### 3.3.5. 秋田県内建設関連事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

秋田県内建設関連事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-16 に示す。

表 3-16 秋田県内建設関連事業者の立場から見た石炭灰利用の現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>フライアッシュ混合コンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなる特性を生かすことで、従来の高炉コンクリートのひび割れの発生率減少になる可能性がある。</li> <li>フライアッシュ混合コンクリートの冬季強度低下対応策は養生時間長期化で解決できる。</li> <li>明石大橋などでの利用実績もある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまでの実績を生かして施工事例を増やすことが必要。</li> <li>施工の結果を国等に説明し、現在の指定に加えてフライアッシュを追加してもらうよう働きかけを行う。</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術的には現行の規格・基準のままで、消波ブロック、コンクリート混和剤、裏込、洗掘防止剤、汚濁防止沈降剤、サンドコンパクションパイルの砂等での利用可能性や、周辺施設として、変電所内の防草対策等にも期待できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来製品と同等、あるいは同等以上の性能が見いだせるかどうかの検証が必要。</li> <li>経済性面で、材料費が下がる等の可能性はあるものの、経済性メリットがあるかどうかの試算が必要。</li> <li>安全性面で、従来基準をクリアした場合にも、現地住民や関連産業関係者の合意、安心確保等の検証が必要。</li> </ul>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>比重アップに向けて、鉄鋼スラグと石炭灰のハイブリット利用、IGCC 溶融スラグと石炭灰のハイブリット利用、銅スラグの活用可能性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>他の素材を調達する場合のコストを含んだ場合のトータルコストの試算が必要。</li> </ul>
その他	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>県の品目指定における用途の拡大が必要(多様な用途で適用するため)。</li> <li>県のみならず、国の品目指定が地域限定であっても必要。</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>利用者増に向けて、製造現場整備にあたっての初期コスト助成制度を国か県が整えることが必要。</li> </ul>
--	--	--

### 3.3.6. 秋田県内石炭灰利用事業者の立場から見た石炭灰利用可能性評価

秋田県内石炭灰利用事業者に対して、洋上風力発電設備への石炭灰利用促進に関するヒアリング調査を実施した結果について、現状課題と対応策を表 3-17 に示す。

表 3-17 秋田県内石炭灰利用事業者の立場から見た石炭灰利用に関する現状課題及び対応策

項目	現状課題	対応策
港湾施設等におけるリサイクル材料の利用状況等	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の指定品目は BB、県の指定品目は、一部地域で FA となっているが、今後 BB 代替として FA の適用を増やすことが必要。</li> <li>効率的な設計による製造ラインも構築され、そこで製造された製品は、用途によりばらつきはあるが、一定の比率で混合できる実績がある。</li> <li>作業性の向上、耐久性の向上、発熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制、ひび割れが入り難い特性も、施工結果から得られている。</li> <li>フライアッシュ (JIS II 種灰) 混合コンクリートを用いたプレキャストコンクリート製品及びフライアッシュ再生碎石は秋田県の認定リサイクル製品として登録されており、県の発注工事で優先的に使用されている実績がある。</li> <li>JIS 灰以外のフライアッシュを活用した採石代替製品も、秋田県内の地域限定ではあるが、出荷・施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FA の性能についての周知活動が必要(そのための根拠となる性能データの提示(ばらつき・変動の情報も含む)も必要、データが存在しない場合はデータ取得も必要)</li> <li>JIS 灰以外のフライアッシュを採石代替として利用するにあたって、競合事業者である採石場との関係があり、価格競争問題にも発展していく。</li> <li>ほかの用途としての利活用についての検討が必要(例えば、FRC の長所である保水性と透水性を利用して、土地造成への利用等)</li> </ul>
洋上風力発電設備におけるリサイクル材料使用可能性等	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用用途として、ケーソン、消波ブロック等が考えられる。</li> <li>洋上風力発電現場のコンクリート製品代替としては、各種特性を生かして、コンクリート製品劣化要因の対策等が行える。また、コスト軽減にもつながり、広範囲の</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実海域(県の管理エリア等)で実証試験を行うことが必要。</li> <li>石炭灰の未燃カーボンによる AE 剤の吸着、未燃カーボン量の変動等の問題に向けた検討が必要。</li> <li>石炭灰の比重が小さいことを解決するための検討が必要である</li> </ul>

	<p>製品に対応可能性は期待できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>洋上風力発電現場の中でも、藻場としての利用にあたっては、既に実証試験等が進められているため、利用可能性は高い。</li> </ul>	<p>とともに、効果的な藻場礁のありかたについての検討も必要。さらに、藻場礁特注の製造現場の改良(型枠製造、蒸気養生庫の確保等)が必要となり、それに伴うコストが必要になることから、販売費と製造費のバランス等を試算する必要がある。</p>
他の素材との組合せ等による利用拡大可能性等	—	—
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来からの取組としてのリサイクルポート構想、エコタウン構想が改めて SDGs の位置づけとしても進む可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SDGs の位置づけでの本調査事業の位置づけ等を行った上で、今後の方向性をまとめることが必要。</li> <li>施工実績を増やすためには、土木学会等のガイドライン策定により、販路拡大に向けた事業展開が促進される。</li> <li>各種施工実績を増やすことにより、他の事業者の同事業への参画が期待できることから、今後も他の事業者へのメリット等広報活動を展開することが必要。</li> <li>施工実績等を、県、国等に報告し、要望を出すことで、国の仕様書への明記等活用促進できるよう働きかけが必要。</li> </ul>

## 4. 国内及び海外における洋上風力発電計画の実態調査

### 4.1. 秋田県における漁業共生に関する取り組み調査

#### (1) 背景及び目的

平成 29 年度(2017 年度)から、JCOAL(一般財団法人石炭エネルギーセンター)では、秋田県岩館漁港における石炭灰を活用した人工藻場実証試験を行っている(図 4-1)。

本実証試験は、①地方創生(現在衰退している藻場の再生を通じた漁業振興)、②リサイクル推進(石炭火力発電所から排出される産業副産物(石炭灰)の有効利用及び用途拡大)の目的で開始されたものであり、地元から発生する副産物である石炭灰を地元で利用すべく新たな市場として、漁場現場での藻場造成、漁場造成に着目したものである。

また、秋田県では、洋上風力発電導入計画が進められる中、地元による漁業共生策を求める声は大きいことからも、本実証試験の成果を生かして、今後洋上風力発電現場での藻場造成、漁場造成機能を果たすべく取組が期待されている。

本実証試験のような石炭灰を実海域で活用した施工事例は未だ少ない状況であるが、本取組により育成された海藻が CO<sub>2</sub>を吸収する、いわゆる「ブルーカーボン」としての効果も期待されており、世界的な温暖化対策にも資するものと言われている。



図 4-1 石炭灰を活用した人工藻場実証試験場所(秋田県山本郡八峰町八森岩館)

#### (2) 実施内容

本実証試験では、3種 18 個の人工藻場ブロックを製造し、平成 29 年 8 月に秋田県岩館漁港に沈設した(図 4-2)。全てのブロックは、ブロックに求められる性能(設計基準強度 15N/mm<sup>2</sup> 単位体積重量 1.7t/m<sup>3</sup>)を満たしている。また、製品ロット毎の微量成分含有量の測定を行うとともに、溶出試験を行い、土壌環境基準を満足していることを確認し安全性評価を行っている。

沈設後、定期的にモニタリング調査を行い、天然の岩礁性藻場との比較検討により人工藻場としての耐久性・性能評価を行っている(1回目:平成 30 年 6 月、2回目:平成 31 年 3 月、3回目:令和元年 7 月)。

種別	名称	配合比率	個数
No.1	オリジナルFRC	石炭灰80%+セメント20%	6個
No.2	スラグFRC	ガス化スラグ80%+セメント20%	6個
No.3	コンクリート	-	6個



図 4-2 人工藻場ブロック種別及び沈設の様子

### (3) 結果

#### 1) 基質安定調査

基質安定調査では、石炭灰ブロックの欠損、転倒の有無の点検及び傾斜度の測定を行った。その結果、18個全ての構造物が、欠損することなく元形状のままで存在していることを確認した。しかし、オリジナル FRC、コンクリート構造物では一部転倒が認められた。各ブロックの比重及び平均移動距離を測定した結果、比重が小さいオリジナル FRC の移動距離が最も大きかった。

日本海エリアは、特に冬季の波浪が強く、沈設物には高い耐久性が求められているが、沈設したすべての構造物が元計上のままで存在することが認められた。特にガス化スラグを混合したブロックは、比重が大きく海底での移動距離も最も小さかったことから、安定性が高いことを確認した。

#### 2) 植生調査

植生調査では、石炭灰ブロックの生物目視観察を行った。その結果、図 4-3 に示すように、海藻の着生は認められ、動物の存在も認められた。また、年数経過に伴い、小型海藻から大型海藻に遷移し、種数増加が認められたが、ブロックの基質の違いによる海藻の着生性能に違いは認められなかった。

沈設後 2 年弱で、海藻の着生及び成長が認められ、アカモクの着生も確認された。また、アワビ等の魚介類の付着も確認でき、動植物のバランスのよい生育環境の創出に結びついていることを確認できたことから、石炭灰及びガス化スラグ混合ブロックが、通常コンクリートブロックと遜色ない性能を保有していることを確認した。

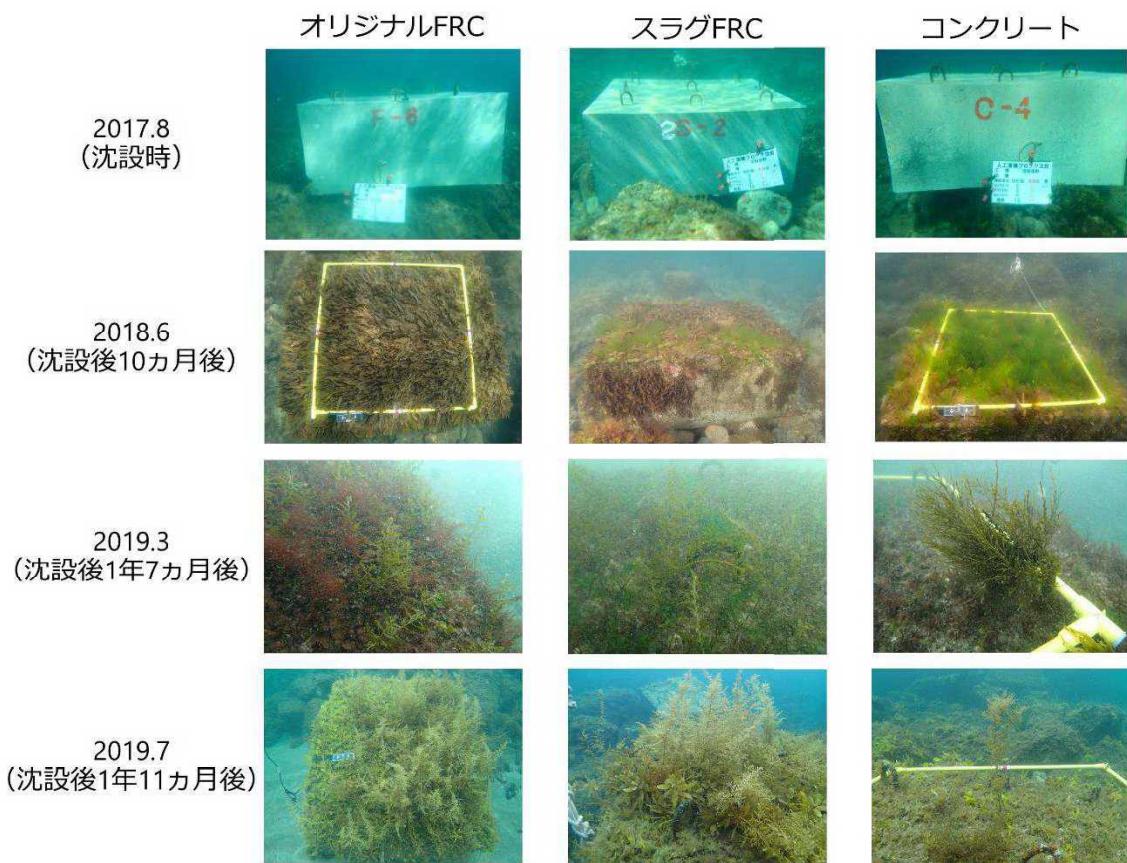


図 4-3 植生調査結果の経年変化

### 3) 海域環境調査

海域環境調査では、水温、塩分、pH、溶存酸素量について測定を行った。その結果、pH の上昇と溶存酸素量(DO)の上昇が見られ、植物プランクトン及び藻場が水中の CO<sub>2</sub>を消費し光合成していることが示唆された。

産業副産物を利用することから、ブロック製造時に微量元素含有量・溶出量試験を行い、土壤環境基準値を下回っていることは確認済みである。沈設後は、当該海域の水温、塩分、pH、DOを測定し、いずれも異常値は認められなかったことから、安全性を確認した。

### 4) 海域環境調査

海域環境調査では、水温、塩分、pH、溶存酸素量について測定を行った。その結果、pH の上昇と DO の上昇が見られ、植物プランクトン及び藻場が水中の CO<sub>2</sub>を消費し光合成していることが示唆された。

産業副産物を利用することから、ブロック製造時に微量元素含有量・溶出量試験を行い、土壤環境基準値を下回っていることは確認済みである。沈設後は、当該海域の水温、塩分、pH、DOを測定し、いずれも異常値は認められなかったことから、安全性を確認した。

### 5) CO<sub>2</sub>吸収量調査

ブロック沈設場所の海水、ブロック上に着生している海藻を刈り取り、CO<sub>2</sub>吸収量を試算した。海

水の CO<sub>2</sub> 吸収量では、大気から海洋への CO<sub>2</sub> 吸収が認められ、ブロックに着生した海藻による CO<sub>2</sub> 吸収量は、年間 5.8~8.3 t-CO<sub>2</sub>/ha/year と試算され、藻場の吸収力によるブルーカーボンの活用を通じた CO<sub>2</sub> 削減を確認した。

#### (4) 考察

秋田県内で稼働している石炭火力発電所からは、現在年間約 30 万トンの石炭灰が発生している。秋田県では、地元から発生する産業副産物としての石炭灰等の有効利用を推進しており、新たな用途拡大に向けた検討を地元リサイクル事業者と連携し進め、地元産業振興も目指している。本取組は、リサイクル推進の観点から、秋田県の産業副産物としての石炭灰を活用し、海洋資源の保全に生かすため、藻場形成のためのブロック製造を行い、石炭灰の人工藻場礁としての機能検証を行うものである。

また、地球温暖化対策として、国は、CO<sub>2</sub> を資源として積極的に活用し循環させていく「カーボンリサイクル」を推進している。その中でも、Negative Emission 技術(NETs)として近年ブルーカーボン(海域で貯留される CO<sub>2</sub>)に注目が集まっており、国土交通省、環境省、水産庁等で、海洋の CO<sub>2</sub> 吸収・固定化促進のための国際ルール作り等が進められている。本取組は、地球温暖化対策の観点から、秋田県岩館漁港の実海域において、藻場を創生し、育成された海藻による CO<sub>2</sub> 吸収・固定化機能の定量評価を進めているものである。

さらに、本取組はで創生を試みる藻場は、上記の通り、CO<sub>2</sub> 吸収源としての機能を果たすとともに、水産生物の生育の場としての機能も果たし、水産資源の維持・増殖に重要な役割を果たしている。しかし、近年、国内の漁場では、自然の藻場が衰退する「磯焼け」の進行が確認されている。秋田県もその影響は大きく、地元名産品である海藻「アカモク(ギバサ)」の漁獲量が年々減少している。また、アカモクに産卵する魚「ハタハタ」の漁獲量も減少しており、漁獲高低下が深刻な問題となっている。本取組では、現在衰退している同地域における藻場の再生を通じて、漁獲高回復を目指している。また、同地域が保有する資源(石炭灰等)、産業、社会インフラ等を活用し、地元自治体や地元企業と連携し、新たな事業創生を通じて雇用促進や地域経済の活性化など地方創生の推進を行っている。

本事業は、世界的な喫緊の課題である地球温暖化対策に資する取り組みという側面に加えて、地元秋田県のニーズに応える取り組みでもある。具体的には、リサイクル推進、地方創生の観点から、本事業が今後拡大されれば、地元で発生した産業副産物を地元企業が活用することを通じて、地元の雇用促進につながり、地域経済の活性化などが期待されるものである。このように本事業は、グローバルな問題解決とローカルな課題解決を両輪と捉えて取り組んでいるものである。

今後、温暖化対策の観点からは、実証試験を通じて、CO<sub>2</sub> 吸収量推移を定量評価する。また、リサイクル推進の観点からは、石炭灰混合ブロックが、自然石と同等の効果を発揮するための最適形状、設置法等検討するとともに、経済性検討を進める。さらに、地方創生の観点からは、継続モニタリングにより、藻場再生状況を確認する。

本事業は、今後も長期的に評価を継続していくものであるが、現時点での成果を元に、秋田県

での新たな事業展開に貢献している。石炭火力発電は代表的なベースロード電源であるが、秋田県のように洋上風力発電等の再生可能エネルギー利用の増加に伴い、ミドル電源の役割を果たすこともありえる。エネルギー推進は、地産地消の観点が重要であることからも、洋上風力発電設備における石炭灰利用促進に向けた調査事業が行われている。

このように、本事業での成果を踏まえ、洋上風力発電導入にあたって、地元産業副産物を活用し安価に製品製造を行うことで現場に適用できれば、建設費削減等コスト削減につながる可能性もあり、再生可能エネルギーと石炭火力発電の調和等新たな事業創出につながる可能性が高いと考えられる。

## 4.2. 県外における洋上風力発電設備に関する実態調査

### 4.2.1. 県外の洋上風力発電プロジェクト実態調査

秋田県では 8 件の風力発電事業が計画されている(出典:4C Offshore、日経産業新聞)。表 4-1 に秋田県で計画されている風力発電事業のリストを示す。計画段階ではあるものの、海外と比べても遜色のない発電容量と風車の数、風車 1 基の発電容量(平均風車出力)となっている。

表 4-1 秋田県で計画されている風力発電事業

事業者	場所	発電容量	風車数	平均 風車出力
住友商事	能代市、三種町、男鹿市沖	500MW	50 基	10MW
ウェンティ・ジャパン、エコ・パワー、三菱商事	秋田市、潟上市沖	500MW	84 基	6.0MW
日本風力開発	八峰町、能代市、三種町、男鹿市沖	1500MW	158 基	9.5MW
ジャパンリニューアブルエナジー	八峰町、能代市沖	180MW	22 基	8.2MW
レノバ、エコ・パワー、東北自然エネルギー、JR 東日本エネルギー開発	由利本荘市沖	700MW	70-90 基	8.8MW
秋田県北部洋上風力合同会社 (大林組、関西電力、秋田銀行、寒風、沢木組、三共、ダイニチ、中田建設、日本電機興業)	能代市、三種町、男鹿市沖	455MW	120 基	3.8MW
丸紅、秋田銀行、中部電力、大森建設、秋木製鋼、寒風、協和石油、沢木組、三共、エコ・パワー、東北自然エネルギー、関西電力、大林組	能代港	88.2MW	20 基	4.4MW
丸紅、秋田銀行、中部電力、大森建設、秋木製鋼、寒風、協和石油、沢木組、三共、エコ・パワー、東北自然エネルギー、関西電力、大林組	秋田港	54.6MW	13 基	4.2MW

次に、県外における風力発電の状況について調査を行った(出典:4C Offshore)。表 4-2 に秋田県外における風力発電事業リストを示す。調査では、商用ではない実証試験の状況についても情報収集を行っており、それらもリストの中に含めている。ここで、面積は風力発電事業の開発区域面積、1 基あたりの面積は風車数で面積を割った値、最低／最大水深は開発区域の水深の最浅部と最深部の深度、距離は沿岸からの距離である。

秋田県外では既に商用運転があるものの、その発電容量や風車 1 基の出力は小さい。ただし、まだ建設は始まってないが、日本でも発電容量や風車 1 基の出力が従来と比較して大型の洋上風力発電が鹿島沖で計画されており、これの実現に期待したい。

表 4-2 秋田県外における風力発電事業リスト

状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
運開：実証	銚子沖洋上風力発電	2013	2.4	1	2.4	Gravity-Base	0.16	0.16	11.9	12	3.1
運開：実証	福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業 2MW ふくしま未来	2013	2	1	2.0	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	10.43	10.4	100	150	20
運開：実証	九州大学風レンズ	2012	0.01	2	0.0	Floating: Semi-Submersible Platform	67.98	34.0	-	-	0.7
運開：実証	7MWふくしま新風 5MW ふくしま浜風	2015	12	2	6.0	Various	-	-	100	150	20
運開：実証	NEDO次世代浮体式洋上風力発電システム実証	2019	3	1	3.0	Floating: Barge - Steel	-	-	50	100	15
運開：商用	せたな町洋上風力発電所 風海鳥	2003	1.32	2	0.7	Grounded: High-Rise Pile Cap	0.01	0.005	13	13	0.7
運開：商用	酒田風力発電事業	2004	10	5	2.0	Grounded: High-Rise Pile Cap	0.04	0.008	4	4	0.01
運開：商用	ウインド・パワーかみす 第1洋上風力発電所	2010	14	7	2.0	Monopile	0.07	0.01	4	4	0.04
運開：商用	ウインド・パワーかみす 第2洋上風力発電所	2013	16	8	2.0	Monopile	-	-	4	4	0.05
運開：商用	崎山沖2MW浮体式洋上風力発電所	2016	2	1	2.0	Floating: Spar Floater - Hybrid	-	-	100	100	5
周辺合意済み：商用	茨城県鹿島港沖大規模海上風力発電所	2020	93.6	18	5.2	Monopile	3.4	0.19	14	18	1.1
周辺合意済み：商用	茨城県鹿島港沖大規模海上風力発電所 丸紅株式会社	2021	93.6	18	5.2	Monopile	3.32	0.18	-	-	0.6

## 崎山沖 2MW 浮体式洋上風力発電所に関する事例調査

2018年11月に成立した「再エネ海域利用法」を受けて、長崎県も有望な区域の一つとして位置付けられている。また、同県では、浮体式洋上風力導入に向けて検討も進められている。今後の秋田県での建設計画を着実に進める上で、長崎県での取り組みは先行事例として参考になるものと考えられるため、以下の通り調査結果を整理した。

基礎構造については、現在のところ、モノパイル式など接地式のものが多いが、崎山沖で浮体式洋上風力発電も行われている。これは国内初の商用の浮体式洋上風力発電となっている（出典：自然エネルギー財団）。

長崎県の五島列島で南西側にある島々は五島市に建設されている(図 4-4 および図 4-5 参照)。五島市は、2017 年時点で人口が約 3 万 8000 人となっており、1955 年のピーク時と比べて人口は 50% 以上も減少している。主要な産業は農業と漁業だが、地元の学生の 9 割は高校を卒業すると東京など都会へ出てしまい、担い手が減る一方で高齢化が進んでいる。この様な状況を少しでも解消するため、新たな産業の創出が必要で、五島市役所が洋上風力発電事業を計画した。



図 4-4 五島列島の主な島々

(出典:長崎県庁ホームページ)



図 4-5 崎山沖浮体式洋上風力発電所位置

(出典:戸田建設ホームページ)

周辺海域は年間を通して強い風が吹くものの、近い沖合でも水深が 100m 以上に達するため、浮体式の洋上風力発電が条件となった。日本では、ヨーロッパと異なり遠浅の海域が多く、これまで浮体式の十分な知見がなかった。そのため、まずは環境省の下、戸田建設を中心に 2011 年から 100kW 浮体式洋上風力発電の実証プロジェクトが開始された。5 年後、実証プロジェクトが終了し、2016 年 3 月に、五島列島の福江島東部の崎山漁港の東へ 5km 沖合で(図 4-5 参照)、浮体式洋上風力発電所が最大出力 2MW で運転を開始した。

崎山沖 2MW 浮体式洋上風力発電所で用いられている風車はダウンウインド型で、基礎構造は、円筒形を縦に長く延ばした「スパー型」と呼ぶ構造を採用し、円筒形の上部を鋼で造り、下部をコンクリートで造る方式でコストダウンとコンクリートの耐水圧、耐錆性を図った「ハイブリッドスパー型」となっている(図 4-6 参照)。

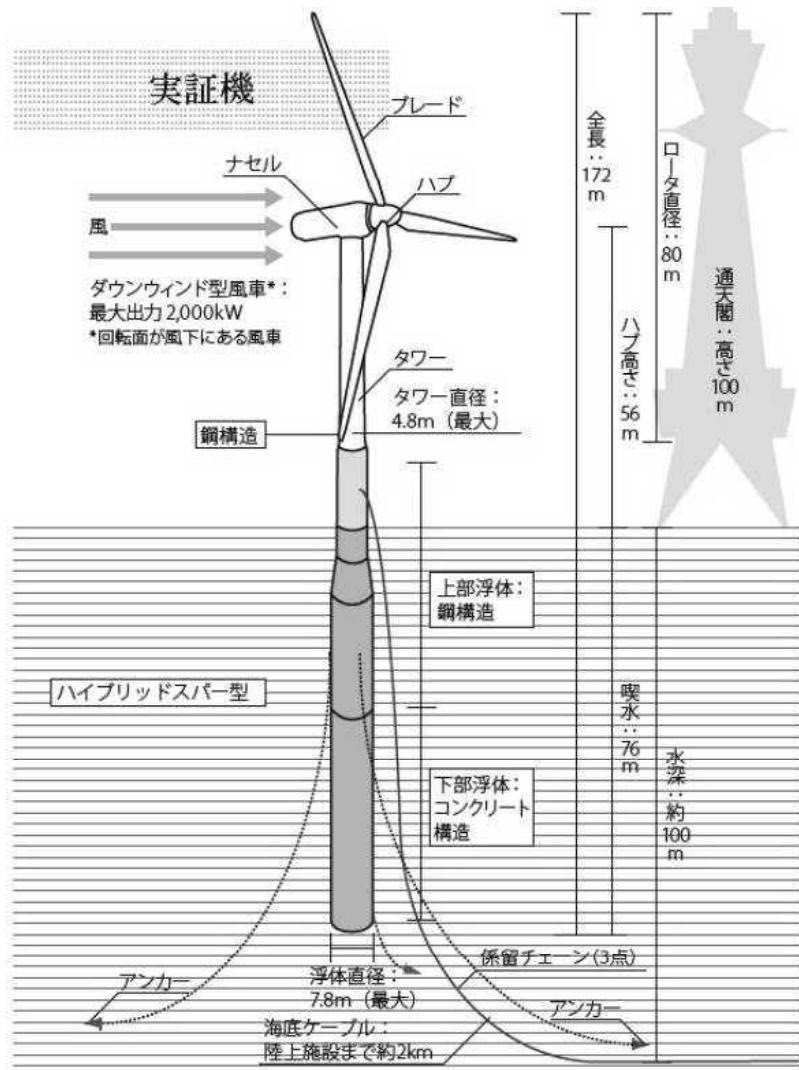


図 4-6 ハイブリットスパー型洋上風力発電設備と係留方法

(出典:佐藤ら)

ハイブリッドスパー型は、上下浮体部分の内部が中空となっており、その浮力で設備が浮き、3本のアンカーで係留されて状態となっている。浮体の製造には従来の土木工事で確立した技術で対応可能となっており、特別な技術を必要としない。そのため、浮体の鋼の部分を長崎県内の工場で、コンクリート部分は五島市の建設会社で製造可能となっている。この基礎構造は、台風のある日本にも適用可能であることが確認されており、100kW 実証試験時の 2012 年 9 月に、戦後最大級の台風 16 号(最大瞬間風速 50m/秒超、波高 17m)が五島列島を襲った際は、全長 70m の 100kW 試験機は 20 度以上も傾いたが倒れなかった。

漁業協調の点では、開発当初は風車が発する騒音や低周波音の影響で魚がいなくなってしまうという声も挙がったが、浮体の水中部分に付着した海藻へ魚群が観測されており、漁礁としての効果も期待されている。図 4-7 に浮体の水中部分に付着した海藻に群がる魚群の様子を示す。また、

洋上に風力発電設備を建設する時に必要になる警戒船の作業を請け負うことや漁協が使っている古い倉庫を改修して、その一部を実証事業でも利用することなどを提案することで、住民を含めて了解を得ることができている。



図 4-7 浮体の水中部分に付着した海藻に群がる魚群の様子  
(出典:海洋エネルギー漁業共生センターホームページ)

崎山沖 2MW 浮体式洋上風力発電所では、風車数が 1 本であることから事業性が低い。発電した電力は固定価格買取制度で九州電力に売電しており、年間の売電量は 560 万 kWh を想定している(標準家庭約 1600 世帯分、福江島の総世帯数の約 1 割をカバー)。2017 年時点での洋上風力発電の買取価格は、国内で実績が多い着床式(発電設備を海底に固定)を前提に決められており、電力 1kWhあたり 36 円(税抜き)である。売電で得られる収入は年間に約 2 億円、固定価格買取制度によって 20 年間で約 40 億円の売電収入を想定できるものの、支出も大きく、ギリギリ黒字になるかどうかの状況である。

政府が 2014 年に洋上風力発電の買取価格を決めた時のコスト調査によると、着床式の発電設備の建設費などを合わせた初期投資は出力 1kWあたり 45~79 万円となっている。仮に着床式で 2MW の発電設備を建設する場合、初期投資に 15 億 8000 万円になる。浮体式は着床式と比べて浮体部分の建設費が高く、沖合で稼働しているため運転維持費も相対的に高くなる。崎山沖 2MW 浮体式洋上風力発電所の場合、発電設備(風力発電機と浮体施設)を五島市が無償で提供していることから、新たに必要な資本費の大半は福江島まで敷設した海底ケーブルと陸上の受変電設備である。最大 2MW の電力を福江島まで送るために、高圧の 6600 ボルトで送電できる海底ケーブルを敷設する必要があり、海底ケーブルは施工費を含めて、1kmあたり約 2 億円のコストが掛かる(5km で約 10 億円)。

同様に、運転維持費について検討すると、着床式の場合、1kWあたり年間 1.5~3.0 万円必要になる。2MW の発電設備の場合、着床式でも運転維持費は年間で 6000 万円(20 年間で 12 億円)となっており、更に長崎県では一般海域の占有料が他自治体と比較して高いため、更に多くの維持費が必要となる。なお、洋上風力発電の場合には、風車のブレードの平面軌跡を投影した面積で占用料が計算され、長崎県の場合、一般海域の占用料は 1 平方メートルあたり年間に 550 円

となっている(香川県の場合 240 円/m<sup>2</sup>)。崎山沖から福江島まで敷設した 5km の海底ケーブルの分を加えると、年間の占用料は約 300 万円となっている。

更に、発電事業を終了した後の設備の撤去に 10 億円程度必要となる見通しであるため、初期投資と運転維持費、廃棄費用を合わせると 20 年間に見込める売電収入 40 億円に近い金額が必要となる。今後の課題として、発電設備の数を増やして 1 基あたりのコスト引き下げが挙げられている。

#### 4.2.2. 日本における洋上風力発電導入の課題

日本における洋上風力発電導入における課題については、2018 年 3 月に一般財団法人新エネルギー財団が「風力発電システムの導入促進に関する提言」を報告しており、これをまとめた。

##### (1) 系統制約の解消

系統の増強、蓄電池の導入、日本版コネクト&マネージの推進や昼間の電力需要創出を行いつつ、余剰の電力をエリア内だけで融通し合うのではなく、全国区で融通しあう必要がある。

##### (2) 洋上風力発電の導入促進

船舶や港湾整備など共通するインフラ整備の課題、洋上風力発電の開発可能海域の選定、漁業協調や一般海域を含めた水域占用上の課題、東アジア特有の気象条件へ対応した設備やその運用の課題、洋上風力発電事業の事前調査からメンテナンスまでを行う作業船群の整備、それら作業船群のための港湾の整備、近隣諸国との連携とその支援などを行うことで洋上風力発電の導入を促進する必要がある。

##### (3) 風力発電のコスト低減に向けた技術開発

ヨーロッパと比較して風速が遅く、台風が発生する東アジア特有の気象条件の中で稼働率を増加させる風車の開発と独自規格の策定が必要であり、これを実施するための产学研官が連携した国を挙げた取り組みが必要である。また、発電コストを低減させるためにも、ブレードのコスト低減、風車の製造、運搬、組立の容易化、機器類サプライチェーン体制の確立が望まれる。

##### (4) 風力発電事業の安定運営・導入拡大に向けた事業環境整備

系統連携強化のため風力発電出力情報の集約による系統運用への反映、人材育成と流動性拡大のため風力発電設備のメンテナンスに関する資格認定の導入の検討、事故時安全対策と再発防止のため事故・故障統計の集約、分析、公開、社会的信頼性確保のため第三者賠償責任保険への強制加入制度の整備、事業者増加による主任技術者確保の容易化のため電気主任技術者選任条件の緩和が必要である。

#### 4.3. ヨーロッパにおける洋上風力発電設備に関する実態調査

ヨーロッパ特に EU 各国では世界に先駆けて風力発電事業に取り組んできており、多くの技術や政策の知見を有している。そのため、EU が陸上・洋上風力発電を今後どのように取り扱っていくのか、どのような課題を持っているのか調査、整理することで、日本、延いては秋田における風力発電の発展に資する情報が得られると考える。以下に、EU におけるエネルギー状況や風力発電状況、プロジェクト事例、洋上風力発電の課題について、日本の状況と比較しながらまとめた。

##### 4.3.1. EU のエネルギー事情

国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) の Energy Outlook 2019 のデータを基に世界、ヨーロッパのエネルギー需要と電源構成、それらの展望をまとめた。

###### (1) エネルギー需要

世界の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望を図 4-8 に示す。2018 年時点では世界の一次エネルギー需要は約 14,300Mtoe あり、化石燃料依存割合は約 8 割であった。その後一次エネルギー需要は増加し、その増加分は化石燃料によって賄われていることが分かる。化石燃料需要増の原因として、電力部門における化石燃料、特に石炭、天然ガスの需要増もあるが、再生可能エネルギーによる代替が困難な産業部門（ボイラ利用など）での石炭と天然ガスの需要増と輸送部門における石油の需要増が挙げられる。図 4-9 と図 4-10 に世界の産業部門と輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望をそれぞれ示す。

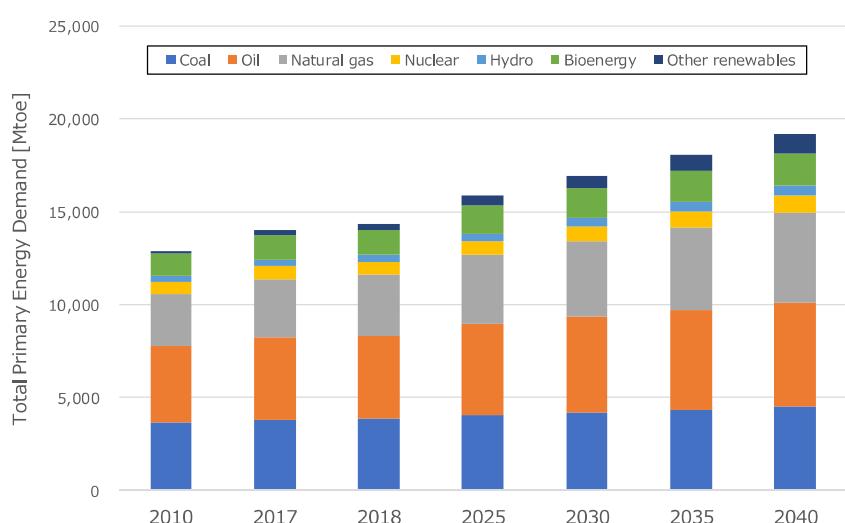


図 4-8 世界の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望

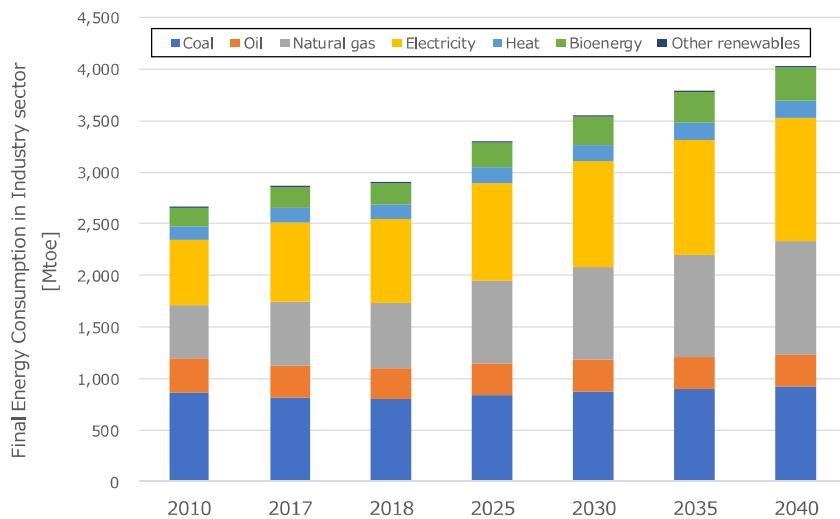


図 4-9 世界の産業部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

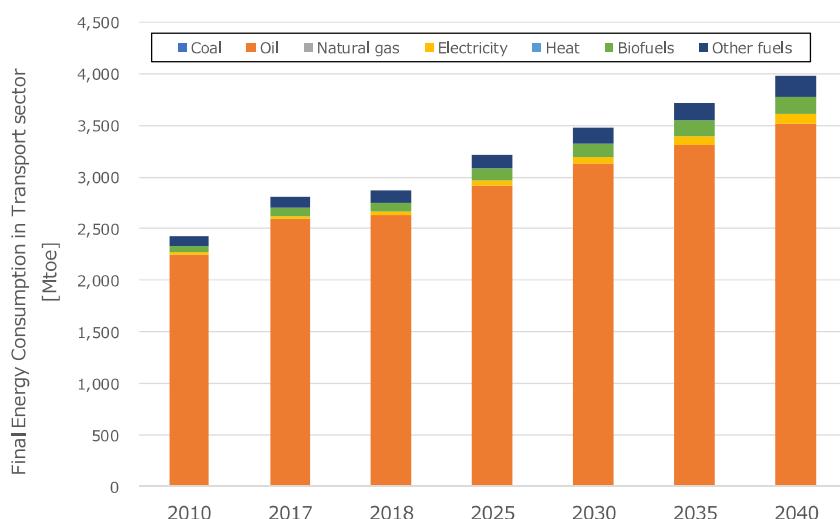


図 4-10 世界の輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

EU の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望を図 4-11 に示す。2018 年時点では EU の一次エネルギー需要は 1,600Mtoe あり、化石燃料依存割合は約 7 割であった。その後一次エネルギー需要は減少し、それが石炭と石油の需要減少によって生じているものであるが、依然として化石燃料への依存割合は約 6 割を占めている。依然として化石燃料への依存割合が高い原因として、再生可能エネルギーによる代替が難しい産業部門（ボイラ利用など）において天然ガスを中心とした化石燃料によるエネルギー消費が変わらないことと輸送部門における石油の需要減が乏しいことが挙げられる。図 4-12 と図 4-13 に EU の産業部門と輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望をそれぞれ示す。

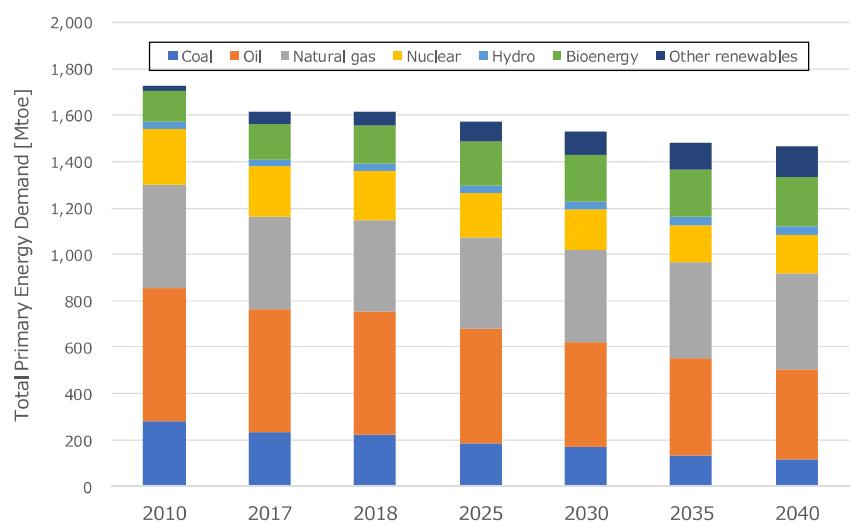


図 4-11 EU の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望

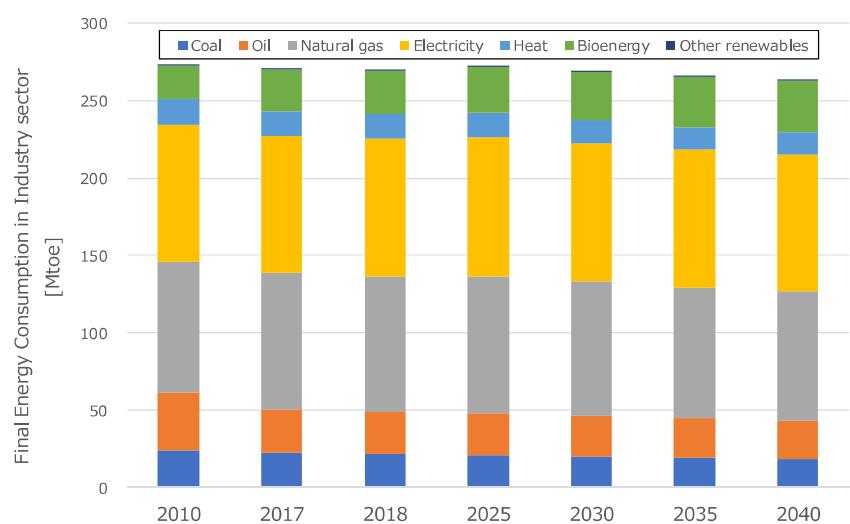


図 4-12 EU の産業部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

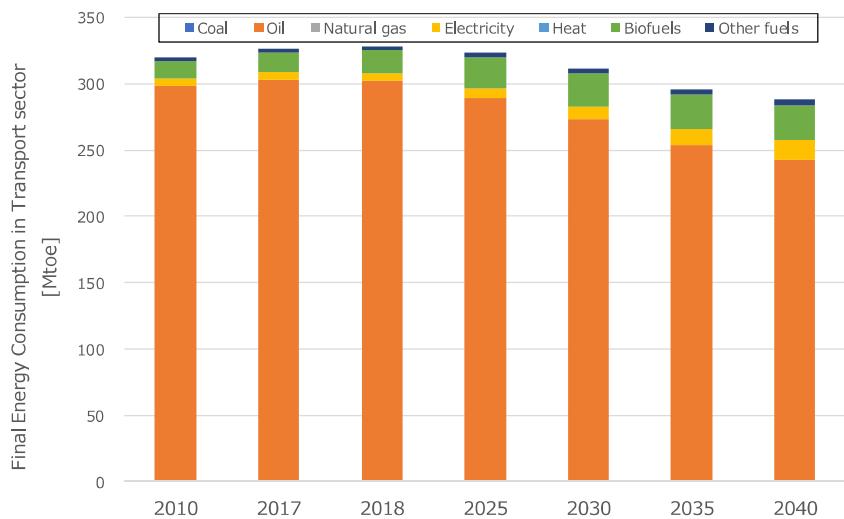


図 4-13 EU の輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

日本の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望を図 4-14 に示す。2018 年時点で日本の一次エネルギー需要は約 430Mtoe あり、化石燃料依存割合は、震災があったこともあり、約 9 割であった。その後一次エネルギー需要は減少し、それが石油の需要減少によって生じているものであるが、依然として化石燃料への依存割合は約 75% を占めている。依然として化石燃料への依存割合が高い原因として、再生可能エネルギーによる代替が難しい産業部門（ボイラ利用など）において化石燃料依存割合が高いことと輸送部門の最終エネルギー消費における石油への依存度が高いことが挙げられる。図 4-15 と図 4-16 に日本の産業部門と輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望をそれぞれ示す。

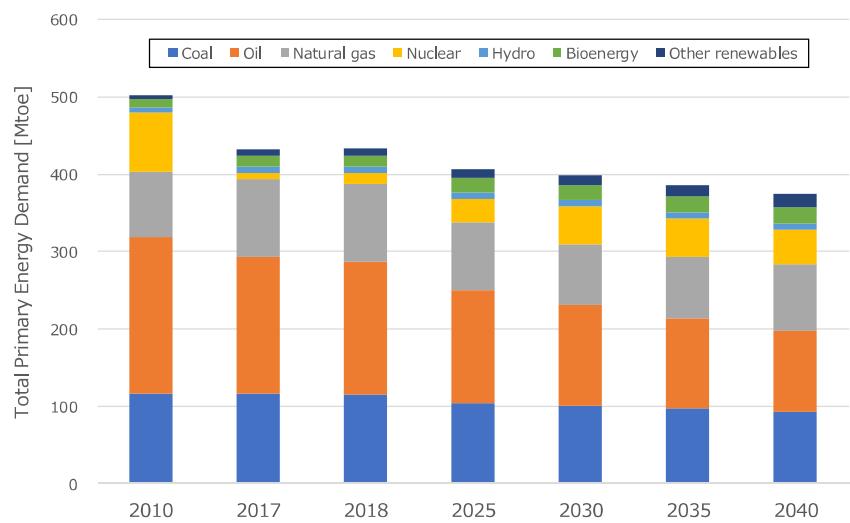


図 4-14 日本の一次エネルギー需要と現在の政策に基づいた将来展望

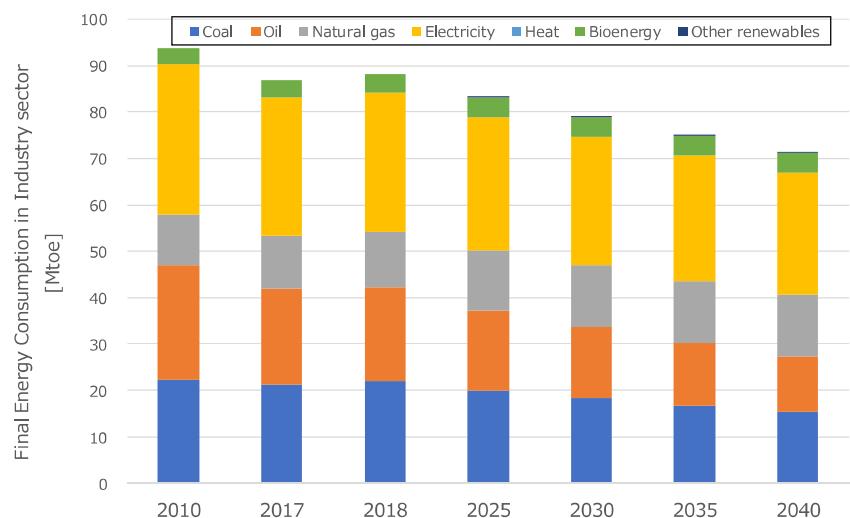


図 4-15 日本の産業部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

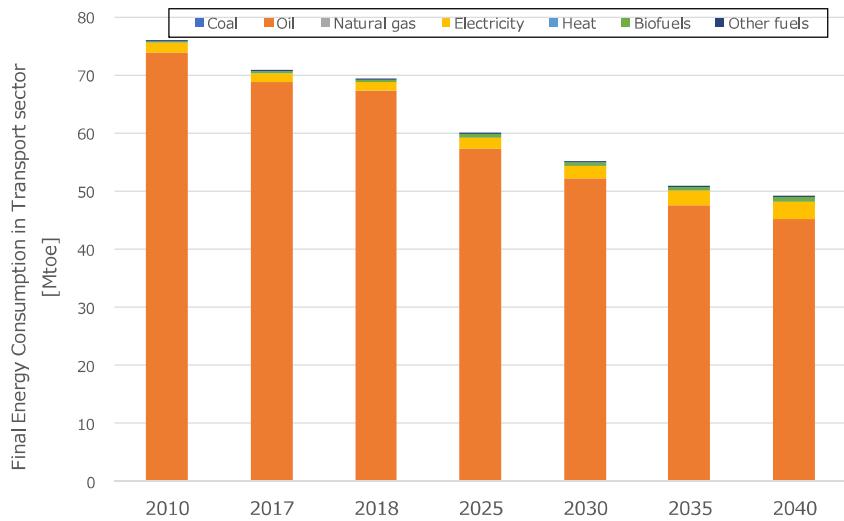


図 4-16 日本の輸送部門における最終エネルギー消費と現在の政策に基づいた将来展望

世界、EU、日本、それぞれ政策など国の事情は異なるものの産業部門と輸送部門において化石燃料への依存度は高い。産業部門においては、ボイラのための単純な熱が必要となる。再生可能エネルギーからの電力によって熱を生成することはできるが、効率が悪い。風力や太陽光等ではなく、バイオマス燃料による熱の生成はあり得るが、バイオマスは供給に制限があるため、やはり代替が難しい。一方、輸送部門においては、現在インフラがガソリンのために作られていることもあり、石油への依存度が高いが、技術開発が進み EV(Electric Vehicle) やハイブリッド車が一般に広がってきていることから、電力需要を満たすことで再生可能エネルギーへの代替が可能であると考えられる。そのため、前述した風力発電の課題を解決していくことで、これまで以上に風力発電を拡大していく余地があると予想される。

## (2) 発電容量と電力需要

世界の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-17 に示す。ここで、CSP は太陽熱発電(CSP:Concentrating Solar Power)である。2018 年時点で世界の発電容量は約 7,200GW あり、化石燃料による発電容量が約 59%、再生可能エネルギーによる発電容量が約 35% 占めていた。その後、発電容量は大きく増加し、2040 年時点で約 12,400GW、化石燃料が 47%、再生可能エネルギーが 49% 占めると予想されている。それぞれ発電容量が大きく増加したのは、化石燃料では天然ガス、再生可能エネルギーでは太陽光と風力であった。

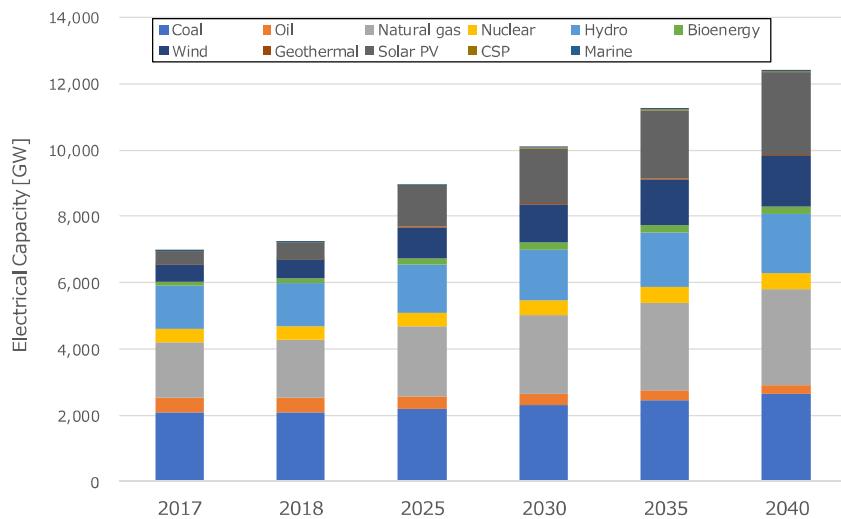


図 4-17 世界の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

世界の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-18 に示す。2018 年時点では世界の総発電量は約 26,600TWh あり、化石燃料による発電量が約 64%、再生可能エネルギーによる発電量が約 26% 占めていた。その後、総発電量は大きく増加し、2040 年時点では約 42,800TWh、化石燃料が 55%、再生可能エネルギーが 36% 占めると予想されている。図 4-17 の発電容量と比較すると化石燃料については、発電容量が増加した分総発電量が増加しており、稼働率が 2040 年時点でも大きく変わらないことが分かる。例えば、石炭火力の場合、発電量を発電容量で除した稼働時間は約 5,000 時間、天然ガスで約 3,500 時間であった。一方で、再生可能エネルギーについては、太陽光の方が風力よりも多くの発電容量を追加したにも係わらず、2040 年時点の太陽光と風力の発電量は同程度であった。それぞれの稼働時間は化石燃料には劣るもの、2018 年と 2040 年時点で太陽光が約 1,200 時間と約 1,500 時間、風力が約 2,200 時間と約 2,800 時間となっており、この稼働時間の違いが発電量増加の違いに繋がったと考えられる。

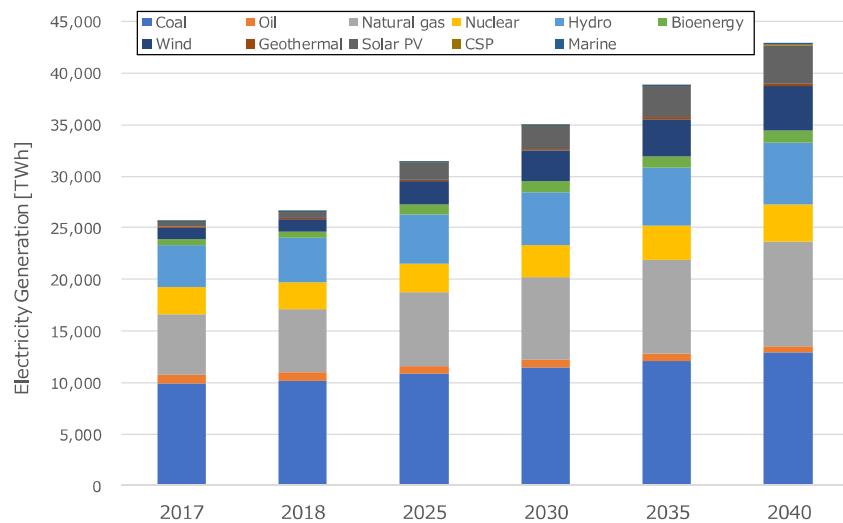


図 4-18 世界の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

EU の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-19 に示す。2018 年時点 EU の発電容量は約 1,050GW あり、化石燃料による発電容量が約 40%、再生可能エネルギーによる発電容量が約 48% 占めていた。その後、発電容量は増加し、2040 年時点で約 1,300GW、化石燃料が 32%、再生可能エネルギーが 61% 占めると予想されている。化石燃料では、天然ガスが増加し、石炭の割合が減少した。再生可能エネルギーでは、風力、太陽光が共に増加していた。

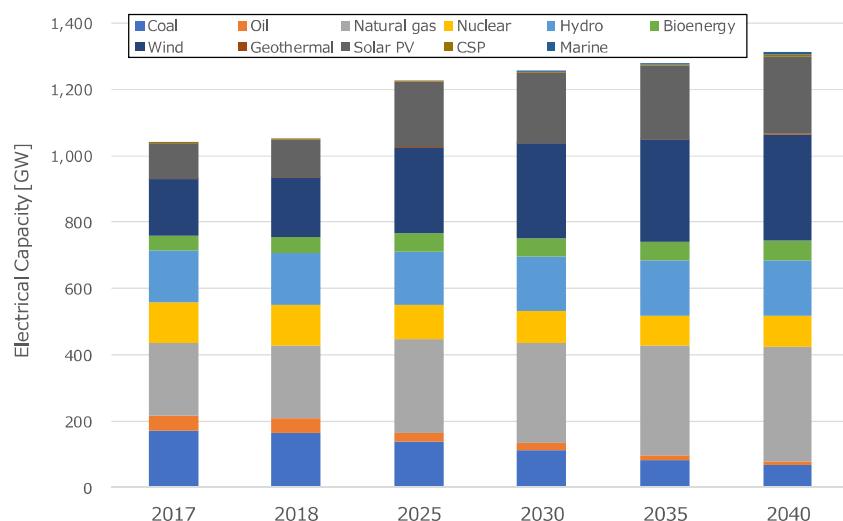


図 4-19 EU の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

EU の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-20 に示す。2018 年時点 EU の総発電量は約 3,300TWh あり、化石燃料による発電量が約 41%、再生可能エネルギーによる発電量が約 33% 占めていた。その後、総発電量は微増し、2040 年時点で約 3,700TWh、化石燃料が 29%、再生可能エネルギーが 54% 占めると予想されている。図 4-19 の発電容量と比較すると化石燃料については、発電容量と発電量の増減傾向は同じであったが、稼働率に違いが生じていた。例えば、石炭火力の場合、発電量を発電容量で除した稼働時間は 2018 年から 2040 年に掛けて約 4,000 時間から約 4,500 時間に変わり、天然ガスで約 2,200 から約 2,900 時間に変わっており、化石燃料による発電所が集約されていることが予想される。一方、再生可能エネルギーについては、より稼働時間の長い風力の発電容量を増やしたことによって、2040 年時点の風力による発電量が 2018 年時点と比較して大きく増加した。それぞれの稼働時間は化石燃料には劣るもの、2018 年と 2040 年時点で太陽光が約 1080 時間と約 1160 時間、風力が約 2,200 時間と約 3,000 時間となっていた。

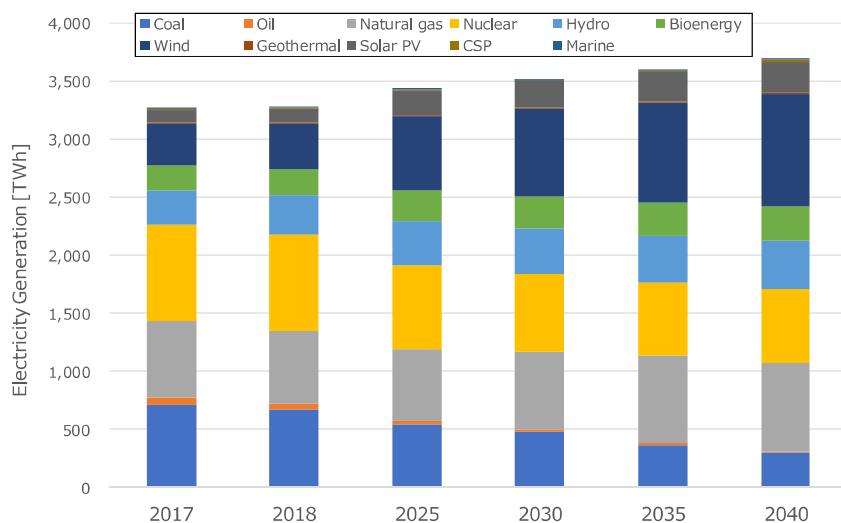


図 4-20 EU の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

日本の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-21 に示す。2018 年時点日本での発電容量は約 340GW あり、化石燃料による発電容量が約 54%、再生可能エネルギーによる発電容量が約 35% 占めていた。その後、発電容量は微増し、2040 年時点で約 350GW、化石燃料が 42%、再生可能エネルギーが 51% 占めると予想されている。化石燃料では、石油の割合が減少し、再生可能エネルギーでは、太陽光が大きく増加した。

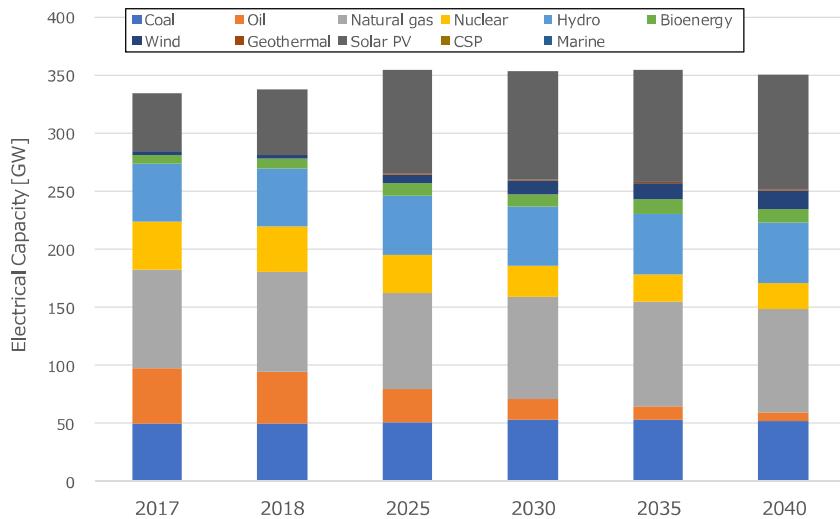


図 4-21 日本の発電容量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

日本の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望を図 4-22 に示す。2018 年時点での日本の総発電量は約 1,050TWh あり、化石燃料による発電量が約 75%、再生可能エネルギーによる発電量が約 20% 占めていた。その後、総発電量は微増し、2040 年時点では約 1,100TWh、化石燃料が 58%、再生可能エネルギーが 27% 占めると予想されている。図 4-21 の発電容量と比較すると、石炭については、発電容量は変わらなかったが発電量が減少した。稼働時間が 2018 年から 2040 年に掛けて約 6,700 時間から約 5,900 時間に減少しており、これが原因と考えられる。天然ガスについては、発電容量は増加したが、発電量は減少した。稼働時間が 2018 年から 2040 年に掛けて約 4,500 時間から約 3,600 時間に減少しており、これが原因と考えられる。ただし、化石燃料による発電の稼働時間は世界、EU と比較して高く、日本は効率よく運転を行っていることが分かる。

再生可能エネルギーについては、稼働時間の短い太陽光の発電容量を大きく増やすことで、再生可能エネルギーの発電容量追加量に対して 2040 年時点の再生可能エネルギーによる発電量は少ない。更に日本における太陽光と風力の稼働時間は、2018 年と 2040 年時点で太陽光が約 1170 時間と約 930 時間、風力が約 1,800 時間と約 2,500 時間となっており、世界、EU と比較して稼働時間が短い傾向がある。このことも再生可能エネルギー発電容量追加に対して発電量が少ない要因となっている。ただし、2040 年時点でそれぞれの稼働時間は世界標準並みになっていることから、今後の技術開発次第で再生可能エネルギーが主力となっていく可能性は十分にあると予想される。

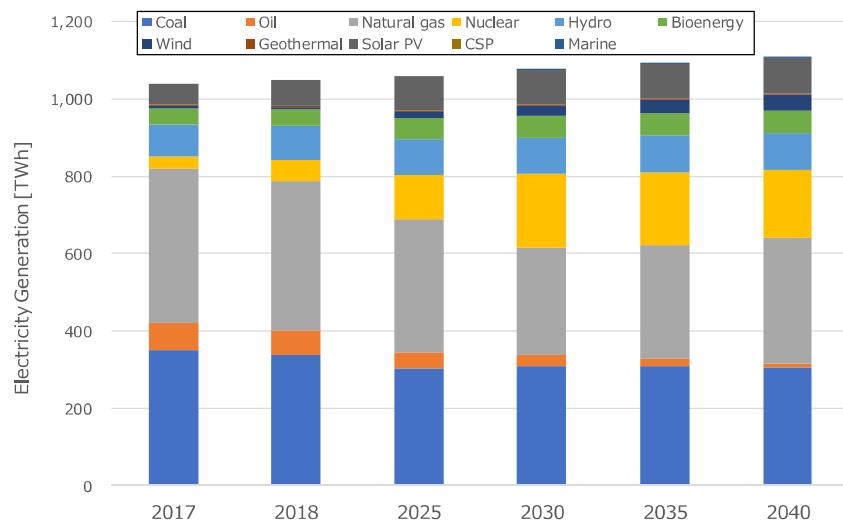


図 4-22 日本の総発電量とその割合及び現在の政策に基づいたそれらの将来展望

#### 4.3.2. EU の風力発電事情

##### (1) EU の洋上風力と陸上風力の割合や将来展望

EU における風力発電の統計とエネルギー予測を調査し、EU における洋上風力と陸上風力の統計情報や将来展望についてまとめた(出典:Wind Europe、2019年2月、10月)。図 4-23 に EU における洋上、陸上発電の発電容量の推移を示す。EU において風力発電は年々増加しており、2018 年には 188GW に達している。導入された風力発電の内、主は陸上風力発電であるものの、近年は洋上風力発電も徐々に増加してきている。図 4-24 に示す風力発電容量の各国の内訳を見ると、ドイツが約 60GW と EU 全体の 1/3 を占めており、スペイン、イギリス、フランスと続いている。また、洋上風力発電に注目すると、日本と同じく回りを海で囲まれているイギリスが最大の発電容量を持っており、次にドイツがあり、この 2ヶ国で EU の約 8 割の洋上風力設備を所有している。ドイツの場合、領海は狭いものの、効率的に大規模な洋上風力発電設備を集中して設置している。ドイツの主要な洋上風力発電設備の配置図を図 4-25 に示す。

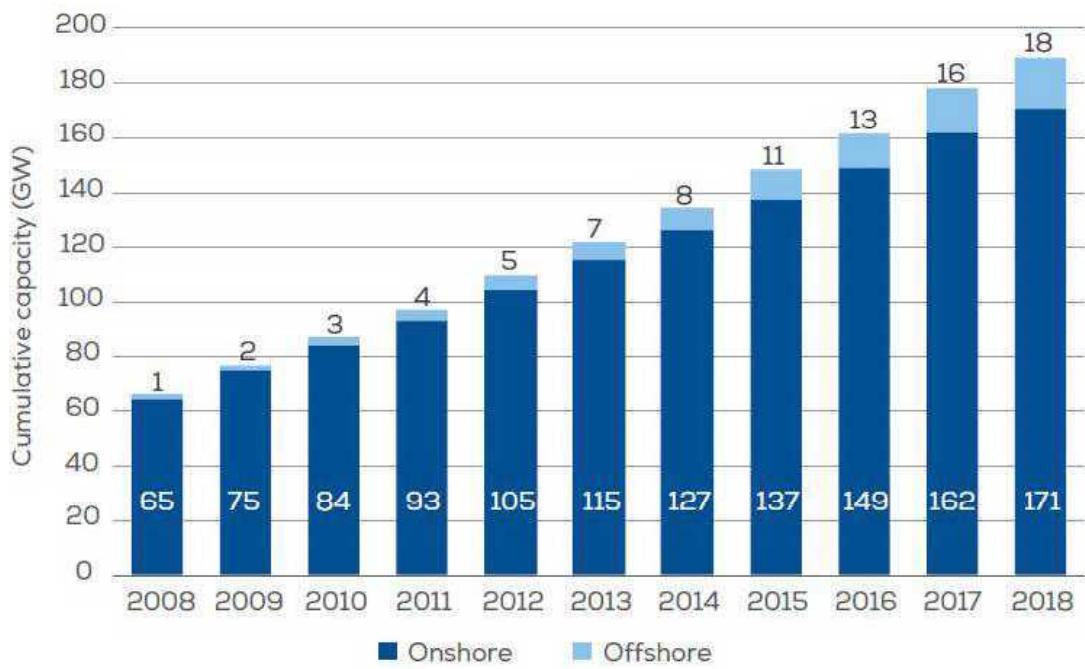


図 4-23 EU における洋上、陸上発電の発電容量の推移

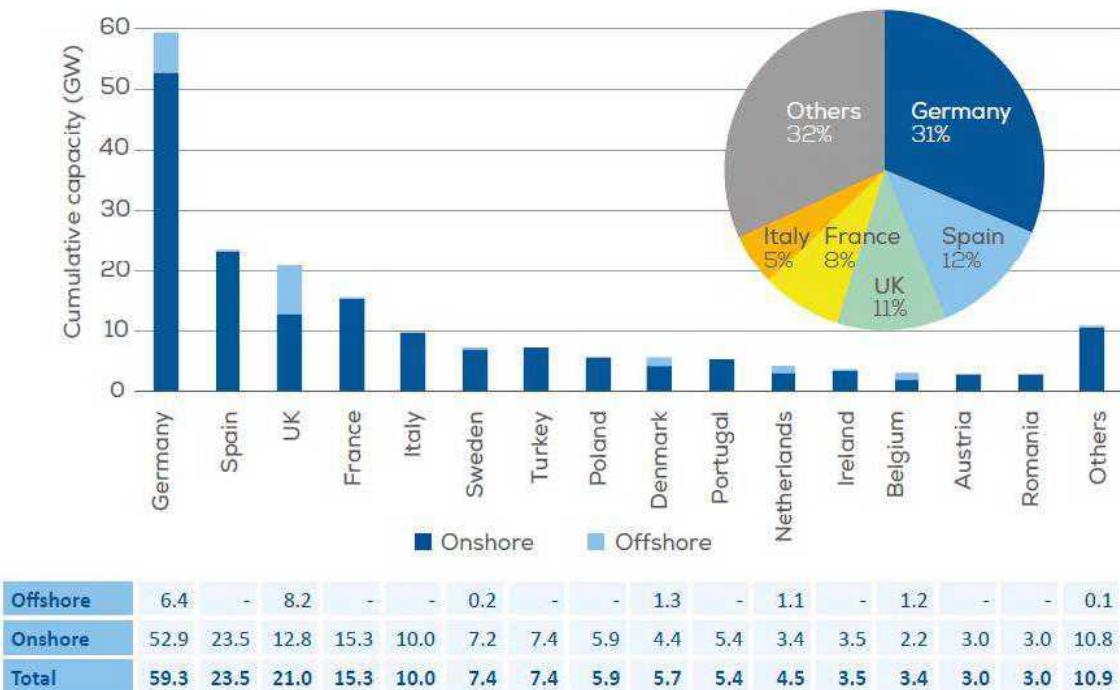


図 4-24 EU における風力発電容量の各国の内訳

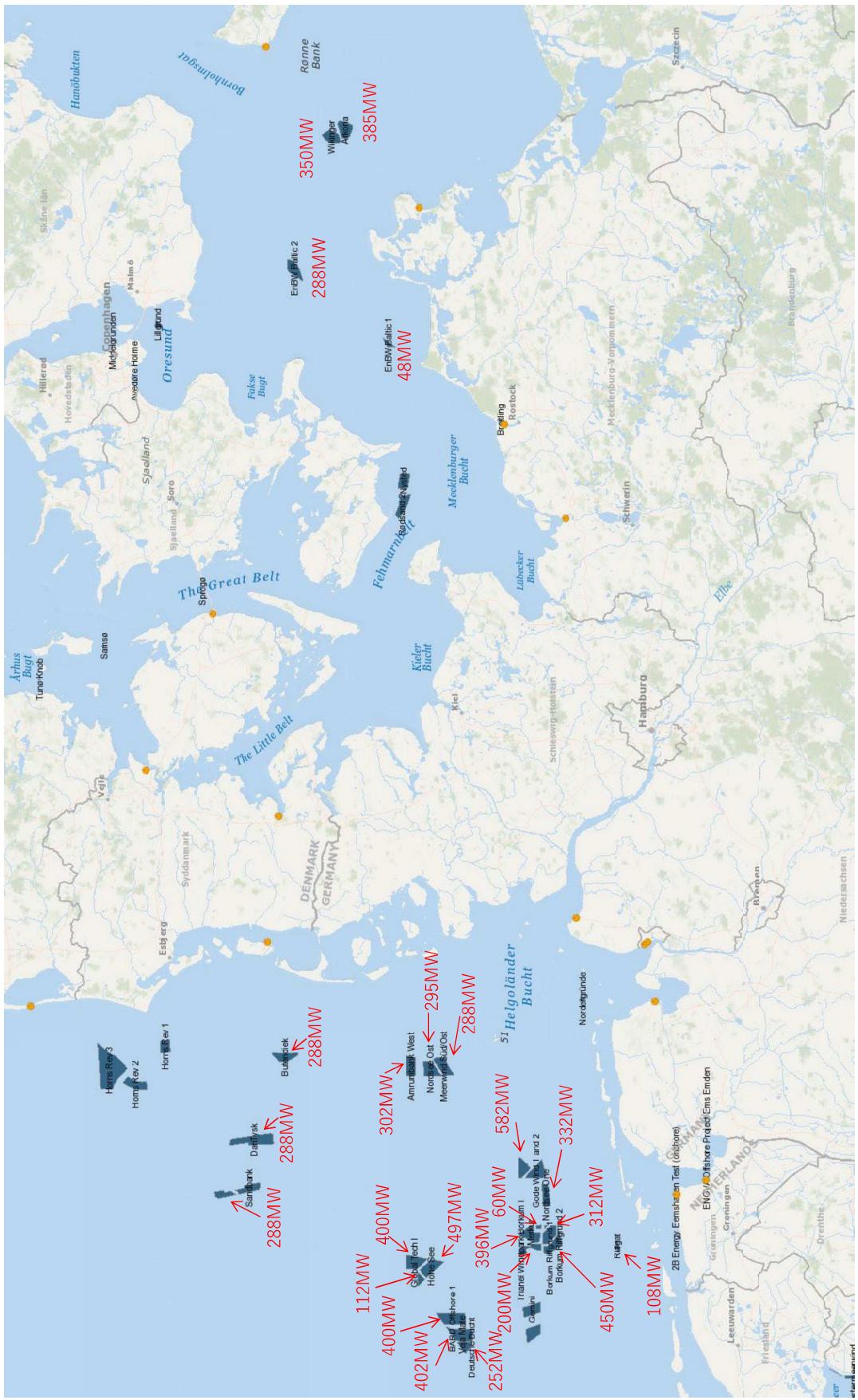


図 4-25 ドイツの主要な風力発電設備の配置図  
(出典:4C Offshore ホームページ)

次に、ヨーロッパにおける陸上、洋上風力発電の展望を図 4-26 に示す。今後も順調に発電容量は追加され、2023 年には、約 280GW まで達する。また、洋上風力発電も一定割合で追加されることが予想されており、2023 年には 2018 年時点の約 2 倍にあたる 36.2GW まで増加する。その中でも領海の多いイギリスが毎年一定量の風力発電設備を導入する他、ドイツに代わりオランダで今後多くの設備導入が行われると予想されている。



図 4-26 EU における陸上、洋上風力発電の将来展望

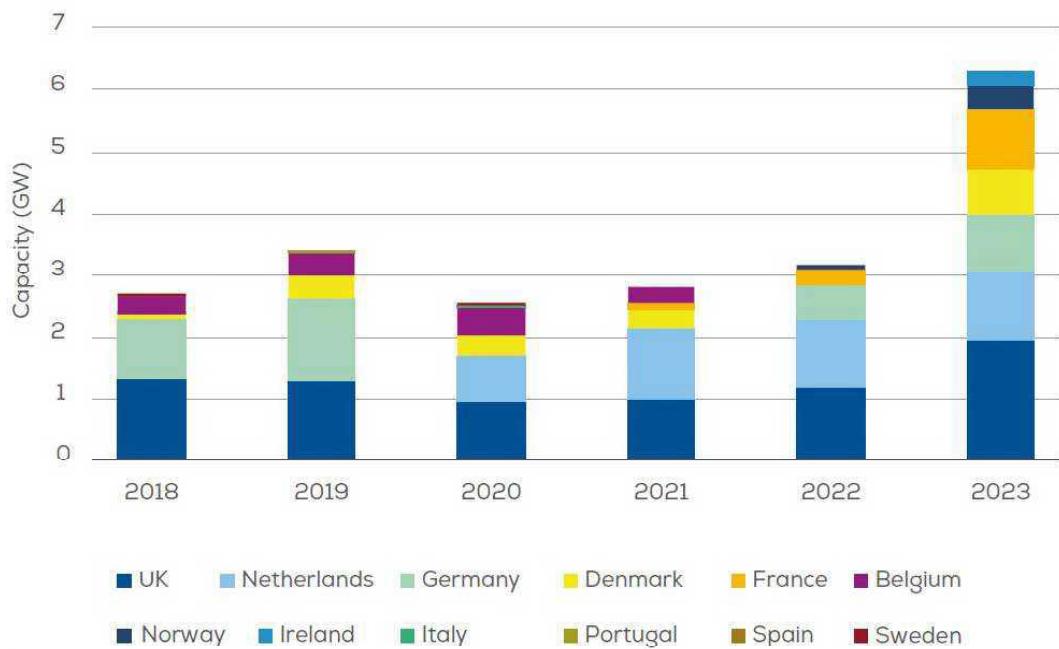


図 4-27 2023 年までの各国の洋上風力発電設備導入展望

## (2) EU 各国の洋上風力発電プロジェクトとその傾向

EU 各国における洋上風力発電事業とその運転状況、発電開始または見込み年、総発電容量、風車の基数、平均タービン規模、タービンの基礎構造、事業面積、タービン 1 基あたりの面積、事業エリアの最低、最大水深、沿岸から事業エリアまでの距離をウェブ調査した(出典:4C offshore)。表 4-3 にこれらを整理した表を示す。EU では、環境アセスメントが完了し、運開が予定、または既に運開している洋上風力事業が 168 ある。運開年は未定であるが、全て合算すると約 51GW 分の発電容量を持つ。これらのデータを整理し、EU における洋上風力発電の傾向について検討を行った。

表 4-3(1) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車 出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたり の面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
UK	運開	Barrow	2006	90	30	3.0	Monopile	9.98	0.333	15	20	7.5
UK	運開	Burbo Bank	2007	90	25	3.6	Monopile	9.94	0.398	0.5	8	6.4
UK	運開	Dudgeon	2017	402	67	6.0	Monopile	55.13	0.823	18	27	35
UK	運開	Greater Gabbard	2010	504	140	3.6	Monopile	146.1	1.044	20	32	36
UK	運開	Gunfleet Sands	2009	172.8	48	3.6	Monopile	15.8	0.329	2	15	7
UK	運開	Gwynt y Môr	2013	576	160	3.6	Monopile	67.98	0.425	12	28	16
UK	運開	Humber Gateway	2015	219	73	3.0	Monopile	26.53	0.363	17	17	10
UK	運開	Inner Dowsing	2008	97.2	27	3.6	Monopile	8.81	0.326	6	14	5
UK	運開	Kentish Flats	2005	90	30	3.0	Monopile	9.95	0.332	5	5	8.5
UK	運開	Lincs	2012	270	75	3.6	Monopile	38.31	0.511	10	15	8
UK	運開	London Array	2012	630	175	3.6	Monopile	106.9	0.611	0	25	20
UK	運開	Lynn	2008	97.2	27	3.6	Monopile	7.88	0.292	6	18	5
UK	運開	North Hoyle	2003	60	30	2.0	Monopile	9.64	0.321	7	11	7.2
UK	運開	Ormonde	2011	150	30	5.0	Jacket (Piled)	9.92	0.331	17	22	9.5
UK	運開	Race Bank	2017	573.3	91	6.3	Monopile	62.36	0.685	6	24	27
UK	運開	Rhyl Flats	2009	90	25	3.6	Monopile	9.73	0.389	6.5	12	8
UK	運開	Levenmouth demonstration turbine	2014	7	1	7.0	Jacket (Piled)	-	-	-	-	0.035
UK	運開	Robin Rigg	2009	174	58	3.0	Monopile	18.34	0.316	4.5	13	11
UK	運開	Scroby Sands	2004	60	30	2.0	Monopile	4.22	0.141	15	15	2.3
UK	運開	Sheringham Shoal	2011	316.8	88	3.6	Monopile	34.97	0.397	15	22	23
UK	運開	Teesside	2013	62.1	27	2.3	Monopile	4.32	0.160	7	15	1.5
UK	運開	Thanet	2010	300	100	3.0	Monopile	34.94	0.349	20	25	12

表 4-3(2) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
UK	一部運開/建設中	Kincardine Offshore Windfarm Project	2018	50	6	8.3	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	25.35	4.225	60	80	15
UK	一部運開/建設中	East Anglia ONE	2019	714	102	7.0	Jacket (Piled)	162.8	1.596	30.5	42	45.4
UK	一部運開/建設中	Hornsea Project One	2019	1218	174	7.0	Monopile	407.3	2.341	23	37	120
UK	建設中	Moray East	2021	950	100	9.5	Jacket (Piled)	295.2	2.952	39	54	22
UK	まもなく建設開始	Hornsea Project Two	2021	1386	165	8.4	Monopile	461.9	2.799	30	40	99.52
UK	まもなく建設開始	Triton Knoll	2021	860	90	9.6	Monopile	149.5	1.661	10	18	33
UK	まもなく建設開始	Near na Gaoithe	2022	448	54	8.3	Jacket (Piled)	105.1	1.946	45	55	15.5
UK	周辺合意済み	Dogger Bank - Creyke Beck B	2024	1200	100	12.0	Monopile	598.9	5.989	20	35	131
UK	周辺合意済み	Dogger Bank - Teesside A	2025	1200	100	12.0	Monopile	560.1	5.601	22	35	196
UK	周辺合意済み	Sofia	2024	1400	140	10.0	Monopile	593.2	4.237	21	36	195
UK	周辺合意済み	Dounreay Tri	-		2	5.0	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	24.99	12.495	60	110	6
UK	周辺合意済み	Seagreen - Phase One	2024	1075	114	9.4	Grounded: Jacket (Suction Bucket)	390.9	3.429	20	60	27

表 4-3(3) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km <sup>2</sup> ]	1基あたりの面積 [km <sup>2</sup> ]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
UK	周辺合意済み	Inch Cape	-	784	72	10.9	Grounded: Jacket (Piled)	149.9	2.082	42	55	15
UK	周辺合意済み	ForthWind Offshore Wind Demonstration Project Phase 1	-	12	2	6.0	Grounded: Jacket (Piled)	-	-	10	20	1.5
UK	周辺合意済み	East Anglia Hub - THREE	2024	1400	172	8.1	Monopile	305.2	1.775	35	45	74
UK	周辺合意済み	Moray West	2026	850	85	10.0	-	226.1	2.659	35	54	22.5
UK	周辺合意済み	Demonstrator Project - Array 3A & 4	-	58.4	10	5.8	-	-	-	43	58	13.8
UK	周辺合意済み	Dogger Bank - Creyke Beck A	2023	1200	100	12.0	Monopile	515.2	5.152	20	35	131
Germany	運開	Alpha Ventus	2009	60	12	5.0	Various	3.93	0.328	27	27	56
Germany	運開	Dan Tysk	2014	288	80	3.6	Monopile	65.66	0.821	21	31	70
Germany	運開	Borkum Riffgrund 1	2015	312	78	4.0	Various	35.7	0.458	23	29	54
Germany	運開	Amrumbank West	2015	302	80	3.8	Monopile	30.17	0.377	21	25	35
Germany	運開	Nordsee Ost	2014	295.2	48	6.2	Jacket (Piled)	35.34	0.736	22	25	57
Germany	運開	Meerwind Süd/Ost	2014	288	80	3.6	Monopile	39.71	0.496	22	26	53
Germany	運開	Butendiek	2015	288	80	3.6	Monopile	33.12	0.414	18	22	32
Germany	運開	Global Tech I	2015	400	80	5.0	Tripod	40.43	0.505	39	41	115
Germany	運開	Hohe See	2019	497	71	7.0	Monopile	40.48	0.570	39	40	90
Germany	運開	Sandbank	2016	288	72	4.0	Monopile	46.94	0.652	25	34	90
Germany	運開	Gode Wind 1 and 2	2016	582	97	6.0	Monopile	69.27	0.714	28	34	45
Germany	運開	Nordergründe	2017	110.7	18	6.2	Monopile	3.42	0.190	4	10	15
Germany	運開	Riffgat	2014	108	30	3.6	Monopile	5.97	0.199	18	23	15

表 4-3(4) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Germany	運開	BARD Offshore 1	2010	400	80	5.0	Triple	58.92	0.737	40	40	101
Germany	運開	Deutsche Bucht	2019	252	31	8.1	Monopile	17.66	0.570	39	41	87
Germany	運開	Merkur	2018	396	66	6.0	Monopile	39.23	0.594	27	33	45
Germany	運開	Trianel Windpark Borkum I	2015	200	40	5.0	Tripod	22.64	0.566	28	33	45
Germany	運開	Nordsee One	2017	332.1	57	5.8	Monopile	29.69	0.521	26	28	40
Germany	運開	Borkum Riffgrund 2	2018	450	56	8.0	Various	35.85	0.640	26	29	56
Germany	運開	Veja Mate	2017	402	67	6.0	Monopile	50.77	0.758	39	41	95
Germany	運開	Albatros	2019	112	16	7.0	Monopile	10.53	0.658	39	40	100
Germany	運開	Breitling	2006	2.5	1	2.5	Gravity-Base	-	-	0.5	0.5	0.3
Germany	運開	Arkona	2019	385	65	5.9	Monopile	37.22	0.573	23	37	35
Germany	運開	Wikinger	2017	350	70	5.0	Jacket (Piled)	32.34	0.462	37	43	35
Germany	運開	EnBW Baltic 2	2015	288	80	3.6	Various	30.2	0.378	23	44	32
Germany	運開	ENOVA Offshore Project Ems Emden	2004	4.5	1	4.5	Monopile	-	-	2	2	0.01
Germany	一部運開/建設中	EnBW Baltic 1	2011	48.3	21	2.3	Monopile	6.98	0.332	16	19	16
Germany	建設中	Trianel Windpark Borkum II	2019	203	32	6.3	Monopile (Suction Bucket)	30.66	0.958	29	33	45
Germany	まだな<建設開始	GICON Schwimmendes Offshore Fundament (SOF) Pilot	-	2.3	1	2.3	Floating: Semi-Submersible Platform - Concrete	0.06	0.030	39	41	87
										-	-	3.25

表 4-3(5) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Germany	周辺合意済み	Borkum Riffgrund 3	2024	900	81	11.1	-	59.61	0.736	30	35	53
Germany	周辺合意済み	Gode Wind 3	2024	241.75	18	13.4	-	13.64	0.758	29	34	39
Germany	周辺合意済み	EnBW He Dreiht	2025	900	90	10.0	-	62.5	0.694	39	40	85
Germany	周辺合意済み	Kaskasi	2022	325	38	8.6	Monopile	17.34	0.456	18	25	47.58
Germany	周辺合意済み	Gennaker	-	865.2	103	8.4	Monopile	45.77	0.444	12.5	20	15
Germany	周辺合意済み	Wikinger Süd	-	10	1	10.0	-	4.42	4.420	27	30	40.92
Germany	周辺合意済み	Arcadis Ost 1	2023	257	27	9.5	Monopile	29.39	1.089	41	46	17
Germany	周辺合意済み	Baltic Eagle	2024	476	52	9.2	Monopile	42.95	0.826	41	44	28
Belgium	運開	Thornton Bank phase I	2009	30	6	5.0	Gravity-Base	0.43	0.072	18	27.5	27
Belgium	運開	Northwind	2014	216	72	3.0	Monopile	13.84	0.192	16	29	37
Belgium	運開	Belwind	2010	165	55	3.0	Monopile	13.19	0.240	15	24	46
Belgium	運開	Norther	2019	369.6	44	8.4	Monopile	38.41	0.873	16	33	23
Belgium	運開	Rentel	2018	309	42	7.4	Monopile	23.25	0.554	22	36	34
Belgium	運開	Nobelwind	2017	165	55	3.0	Monopile	22.33	0.406	26	38	47
Belgium	運開	Thornton Bank phase II	2012	184.5	30	6.2	Jacket (Piled)	12.12	0.404	12	24	27
Belgium	運開	Thornton Bank phase III	2013	110.7	18	6.2	Jacket (Piled)	7.29	0.405	12	25.5	26
Belgium	運開	Belwind Alstom Haliade Demonstration	2014	6	1	6.0	Jacket (Piled)	-	33.72	-	33.72	-
Belgium	建設中	Seamade (SeaStar)	2020	252	30	8.4	Monopile	18.41	0.614	22	38	40
Belgium	建設中	Seamade (Mermaid)	2020	235	28	8.4	Monopile	16.27	0.581	24.4	39.5	54
Belgium	建設中	Northwester 2	2020	219	23	9.5	Monopile	11.8	0.513	25	40	40
Denmark	運開	Samsø	2003	23	10	2.3	Monopile	0.09	0.009	13.5	19.5	4.01
Denmark	運開	Horns Rev 1	2002	160	80	2.0	Monopile	20.67	0.258	6	14	17.9
Denmark	運開	Rønland	2002	17.2	8	2.2	High-Rise Pile Cap	0.05	0.006	-	-	0.09

表 4-3(6) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Denmark	運開	Tunø Knob	1995	5	10	0.5	Gravity-Base	0.32	0.032	-	-	5.53
Denmark	運開	Nysted	2003	165	72	2.3	Gravity-Base	25.93	0.360	6	10	10.75
Denmark	運開	Middelgrunden	2000	40	20	2.0	Gravity-Base	0.18	0.009	3	5	4.71
Denmark	運開	Frederikshavn	2002	10.6	4	2.7	Various	0.02	0.005	-	-	3.23
Denmark	運開	Horns Rev 2	2009	209.3	91	2.3	Monopile	33.2	0.365	9	17	31.73
Denmark	運開	Rødsand 2	2010	207	90	2.3	Gravity-Base	33.87	0.376	6	12	8.83
Denmark	運開	Sprogø	2009	21	7	3.0	Gravity-Base	0.08	0.011	6	16	10.6
Denmark	運開	Anholt	2012	399.6	111	3.6	Monopile	115.9	1.045	15	19	15
Denmark	運開	Avedøre Holme	2009	10.8	3	3.6	Gravity-Base	0.06	0.020	0.5	2	0.01
Denmark	運開	Horns Rev 3	2018	406.7	49	8.3	Monopile	144.2	2.943	10	21	20
Denmark	運開	Nissum Bredning Vind	2018	28	4	7.0	Jacket (Gravity)	4.98	1.245	0.9	6	2.5
Denmark	まもなく建設開始	Kriegers Flak	2021	605	72	8.4	Monopile	182.5	2.535	15	30	15
France	運開	SEM-REV - SITE D'EXPERIMENTATION EN MER - MARINE TEST SITE	2015	8	-	-	Floating: Semi-Submersible Platform	1.15	-	35	35	24
France	運開	Floatgen Project	2018	2	1	2.0	Barge - Concrete	-	-	33	33	22
France	まもなく建設開始	Projet de parc éolien en mer de Saint-Nazaire	2022	480	80	6.0	Monopile	74.98	0.937	12	23	12
France	周辺意済み	Parc éolien en mer de Dieppe - Le Tréport	2023	496	62	8.0	Jacket (Piled)	109.3	1.764	5	25	15
France	周辺意済み	Parc éolien en mer de Fécamp	2023	498	83	6.0	Gravity-Base	87.9	1.059	24	31	13

表 4-3(7) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km <sup>2</sup> ]	1基あたりの面積 [km <sup>2</sup> ]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
France	周辺合意済み	Eoliennes Offshore du Calvados project	2023	450	75	6.0	Monopile	77.81	1.037	21	29	11
France	周辺合意済み	Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc	2022	496	62	8.0	Jacket (Piled)	102.3	1.649	29	42	16.3
France	周辺合意済み	Parc des îles d'Yeu et de Noirmoutier	2023	496	62	8.0	Jacket (Piled)	111.8	1.803	17	35	16.5
France	周辺合意済み	Nénuphar test site - MISTRAL - Golfe de Fos	-	10	3	3.3	Floating: Semi-Submersible Platform	-	-	50	70	5
France	周辺合意済み	Les éoliennes flottantes de Groix & Belle-Île	2022	28.5	3	9.5	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	16.74	5.580	54	71	22
France	周辺合意済み	Les éoliennes flottantes du Golfe du Lion	2022	30	3	10.0	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	56.18	18.727	65	80	17
France	周辺合意済み	Les éoliennes flottantes Provence Grand Large	2022	25.2	3	8.4	Floating: Semi-Submersible Platform - Concrete	0.56	0.187	94	104	17

表 4-3(8) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Ireland	運開	Arklow Bank Phase 1	2004	25.2	7	3.6	Monopile	2.37	0.339	10	25	10.05
Ireland	運開	Galway Bay Marine and Renewable Energy Test site	-	-	3	-	Floating	0.37	0.123	20	23	1.27
Ireland	建設中	Atlantic Marine Energy Test Site	2022	10	1	10.0	Floating	-	-	50	100	16
Ireland	周辺合意済み	Coddling Wind Park	-	1100	220	5.0	-	59.48	0.270	9	16	13
Ireland	周辺合意済み	Arklow Bank Phase 2	2024	1000	100	10.0	-	64.25	0.643	5	25	13
Netherlands	運開	Prinses Amaliawindpark	2008	120	60	2.0	Monopile	21.62	0.360	19	24	23
Netherlands	運開	Egmond aan Zee	2006	108	36	3.0	Monopile	24.46	0.679	16	21	10
Netherlands	運開	Gemini	2016	600	150	4.0	Monopile	69.53	0.464	28	36	85
Netherlands	運開	Irene Vorrink	1996	16.8	28	0.6	Monopile	-	-	2	3	0.03
Netherlands	運開	Eneco Luchterduinen	2015	129	43	3.0	Monopile	16.17	0.376	18	24	23
Netherlands	運開	Westermeerwind	2015	144	48	3.0	Monopile	8.41	0.175	5	5	0.5
Netherlands	建設中	Borssele 3 and 4 - Blauwwind	2020	731.55	77	9.5	Monopile	121.9	1.584	15	37	31
Netherlands	まもなく建設開始	Borssele 1 and 2	2020	752	94	8.0	Monopile	112.6	1.198	16	36	22
Netherlands	まもなく建設開始	Windpark Fryslân	2021	382.7	89	4.3	Monopile	34.84	0.391	2.7	6.1	5.6
Netherlands	まもなく建設開始	Borssele Site V - Leeghwater - Innovation Plot	2020	20	2	10.0	Monopile	0.59	0.295	30	35	75
Netherlands	周辺合意済み	Holland I and II - Chinook - (Tender 2017)	Hollandse Kust Zuid	2022	700	70	Monopile	103.1	1.472	18	22	30
Finland	運開	Reposaaren tuulipuisto	2010	2.3	1	2.3	Gravity-Base	-	-	9	9	6.58

表 4-3(9) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km2]	1基あたりの面積 [km2]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Finland	運開	Tahkoluoto Offshore Wind Power Project	2017	42	10	4.2	Gravity-Base	6.48	0.648	8	15	0.5
Finland	運開	Ajos	2016	26.4	8	3.3	Artificial Island	3.15	0.394	-	-	-
Italy	まもなく建設開始	Parco eolico nella rada esterna del porto di Taranto	2020	30	10	3.0	Monopile	0.73	0.073	4	18	-
Portugal	建設中	WindFloat Atlantic (WFA)	2019	25	3	8.3	Floating: Semi-Submersible Platform - Steel	11.29	3.763	85	100	20
Spain	運開	PLOCAN (Plataforma Oceanica de Canarias) - phase 1	-	10	5	2.0	Various	20.49	4.098	-	-	10
Spain	運開	ELISA/ELICAN - Mario Luis Romero Torrent (PLOCAN site)	2019	5	1	5.0	Gravity-Base	-	-	30	30	1.5
Spain	運開	Biscay Marine Energy Park (BIMEP)	2015	-	-	-	Floating	5.28	-	-	-	-
Spain	周辺意済み	DemoSATH - BIMEP	2020	2	1	2.0	Floating: Barge - Concrete	-	-	85	90	2
Spain	周辺意済み	BlueSATH	2020	0.03	-	-	Floating: Barge - Concrete	-	-	-	-	-

表 4-3(10) EUにおける風力発電事業リスト

国	状態	プロジェクト名	運開年	発電容量 [MW]	風車数	平均風車 出力[MW/基]	基礎構造	面積 [km <sup>2</sup> ]	1基あたり の面積 [km <sup>2</sup> ]	最低水深 [m]	最大水深 [m]	距離 [km]
Sweden	運開	Bockstigen	1998	3.3	5	0.7	Monopile	0.25	0.050	6	6	4
Sweden	運開	Lillgrund	2007	110.4	48	2.3	Gravity-Base	6.88	0.143	4	8	11.3
Sweden	運開	Vindpark Vänern	2009	30	10	3.0	Rock-Anchored Concrete Rings	3.48	0.348	3	13	3.5
Sweden	運開	Kårehamn	2013	48	16	3.0	Gravity-Base	1.81	0.113	8	20	3.8
Sweden	運開	SeaTwirl S1	2015	0.03	1	0.0	Floating: Spar Floater	-	-	-	-	-
Sweden	周辺合意済み	Kriegers Flak II	-	640	80	8.0	-	63.03	0.788	16	42	32.72
Sweden	周辺合意済み	Storgundet	-	420	70	6.0	Gravity-Base	67.43	0.963	10	25	11
Sweden	周辺合意済み	Stora Middegrund	-	864	108	8.0	Monopile	65.48	0.606	12	31	25
Sweden	周辺合意済み	Stenkälles grund	-	100	20	5.0	Rock-Anchored Concrete Rings	10.72	0.536	5	20	4.5
Sweden	周辺合意済み	Kattegatt Offshore	-	282	47	6.0	-	22.1	0.470	-	-	-

表 4-3 を用いて洋上風力発電の各データの関係性について整理を行った。図 4-28 に運開年と発電容量の関係を示す。EUにおいても、浮体式ではなく、着床式(モノパイル式、ジャケット式、重力式)が主流であることが分かる。また、着床式の中でもモノパイルとジャケット式は年を追うごとに 1 事業における発電容量が増加しており、2019 年には、モノパイル式で 1GW を超える事業が運開する。重力式についても増加傾向にあることは分かるが、他に比べて増加スピードは緩慢である。浮体式については、明確な増加傾向は観察されず、またその発電容量は少なかった。以上より、今後も着床式、特にモノパイル式、ジャケット式で発電容量は増加していくと予想される。

日本のデータも図 4-28 に白抜きで示しているが、最大のものでもモノパイル式で 90MW 程度であり、EU と比較すると発電容量が小さいことが明らかである。

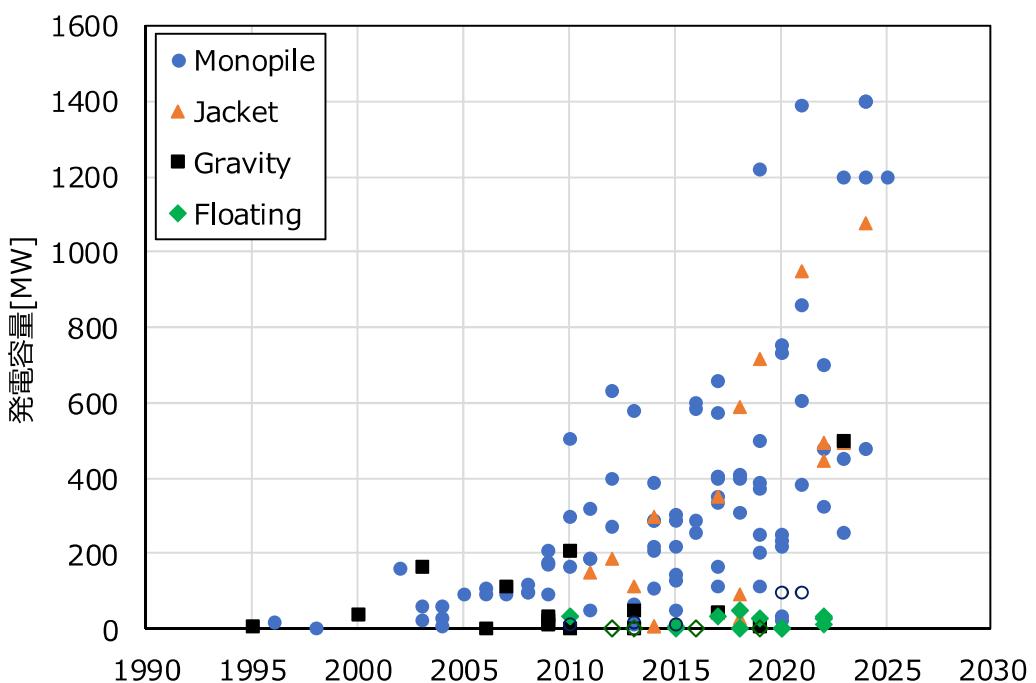


図 4-28 運開年と発電容量の関係(白抜きは日本)

図 4-29 に運開年とタービン 1 基あたりの発電容量の関係を示す。EU では、技術の発展と共にモノパイル式、重力式、浮体式のタービン 1 基あたりの発電容量が年々増加しており、2025 年にはモノパイル式で 1 基あたり 12MW になる見通しである。一方、ジャケット式については、初期より 8MW を超える大容量のものであった。これは、ジャケット式が地盤や波浪の影響を受け難い基礎構造タイプであり、基礎が安定していることから、初期から大容量のタービンを設置できたと推測される。

日本のデータも図 4-29 に白抜きで示しているが、2015 年までは EU に劣らない発電容量を示していたが、以降は 6MW を超えることができていない。日本の気象条件による影響が要因の 1 つであると予想される。将来、波浪の影響が強い日本でもジャケット式が普及する可能性があるが、

石油ガスプラットフォームで多くの実績がある手法であり、かつ構造が複雑で施工に技術が必要であることから、更なる技術開発は必要である。

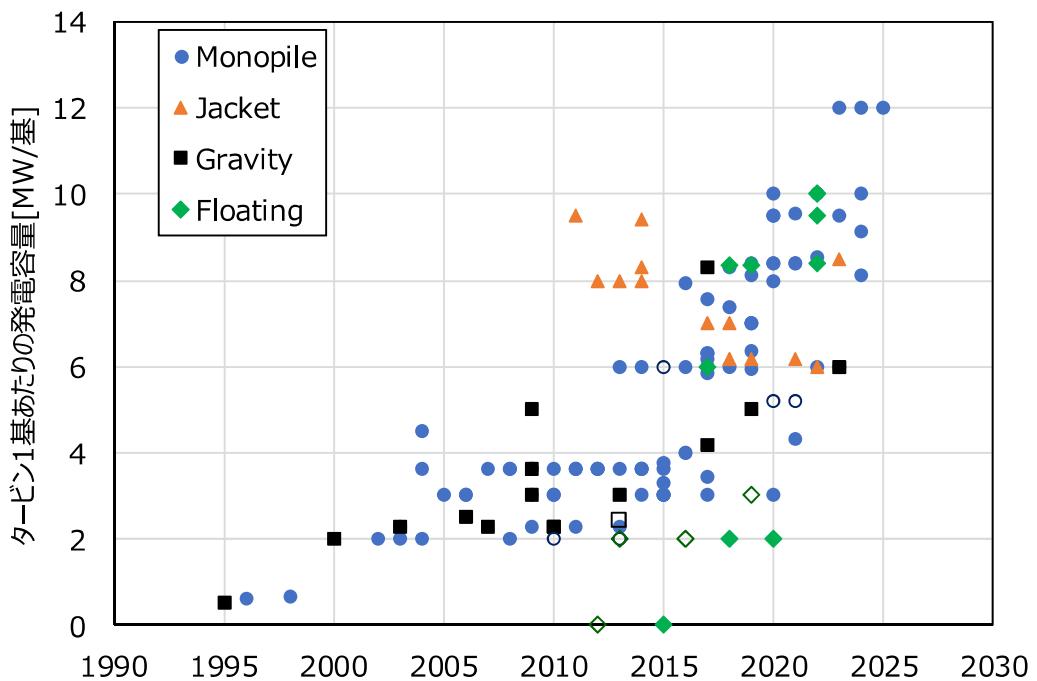


図 4-29 運開年とタービン 1 基あたりの発電容量の関係(白抜きは日本)

図 4-30 にタービン 1 基あたりの発電容量と面積の関係を示す。図 4-31 のタービン発電容量とローター径の関係に示すとおり、発電容量が増加するとローター径も増加する。そのため、全ての基礎構造において、発電容量が増えると必要な面積も増加する傾向を示した。ただし、10MW でローター径が 160m であるのに対し、必要な面積は 2km 四方であり、より効率的に風のエネルギーを捉えるため、ある程度風車を離す必要があることが分かる。その他、同容量で比較すると、浮体式>モノパイル式>ジャケット式の順に必要な面積が広い傾向を示した。

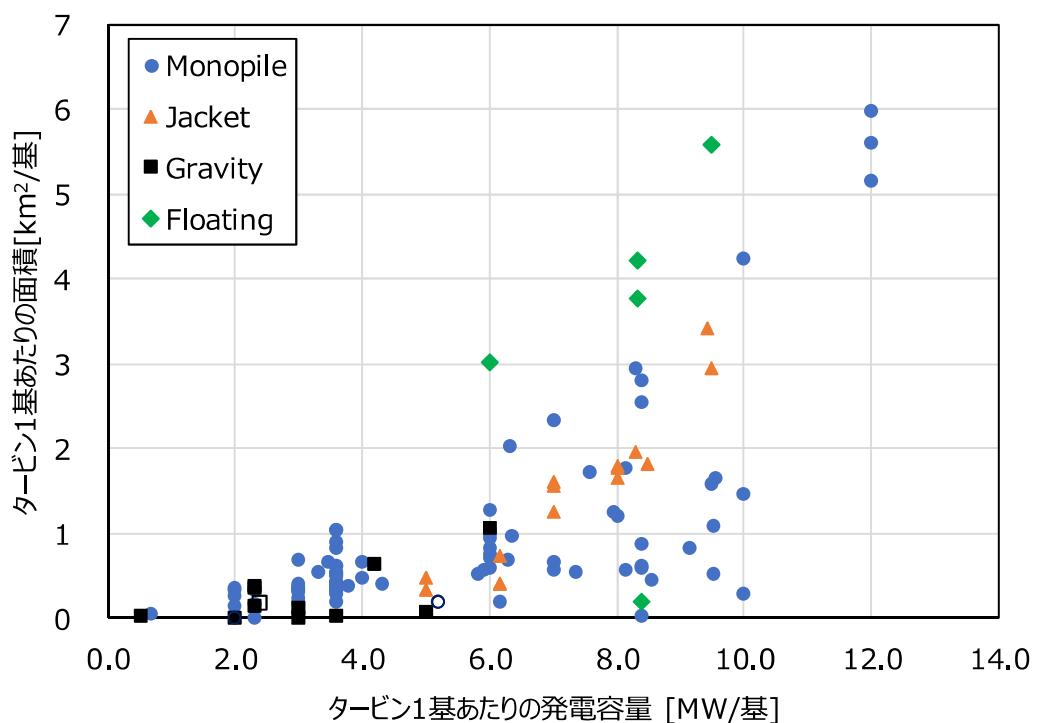


図 4-30 タービン 1 基あたりの発電容量と面積の関係(白抜きは日本)

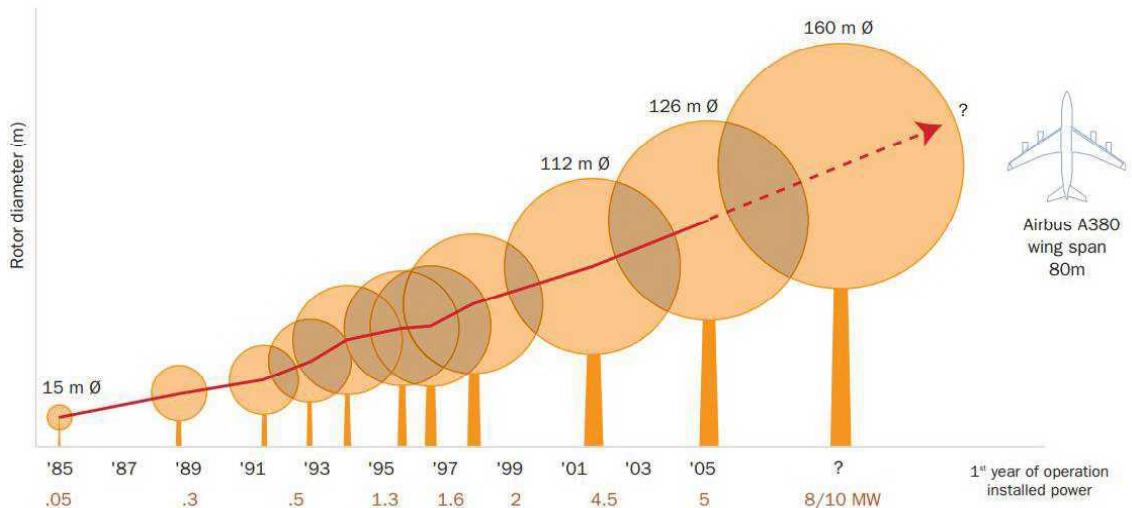


図 4-31 タービン 1 基の発電容量とローター径の関係

(出典:EWEA)

図 4-32 に運開年と水深の関係を示す。EU における洋上風力発電の設置深度は年々徐々に深くなっていくものの、モノパイル式、重力式で 50m 以浅、ジャケット式で 60m 以浅であった。従来報告されているとおり、60m 深が着床式基礎構造の限界であることが分かる(出典:Musialら)。図 4-33 に各基礎構造における深さと建設コストの関係を示す。

日本のデータも図 4-32 に白抜きで示している。日本の場合、浮体式を EU 並みの深度で実施している。これは、日本の近海でも深度が深い地理的条件による結果だと考えられる。

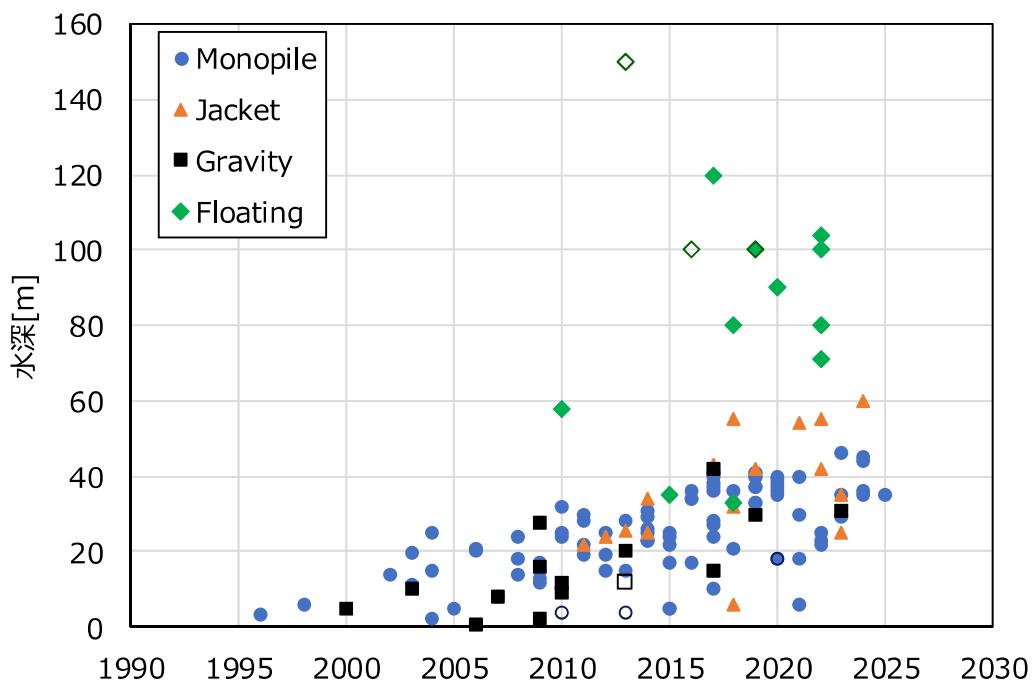


図 4-32 運開年と水深の関係(白抜きは日本)

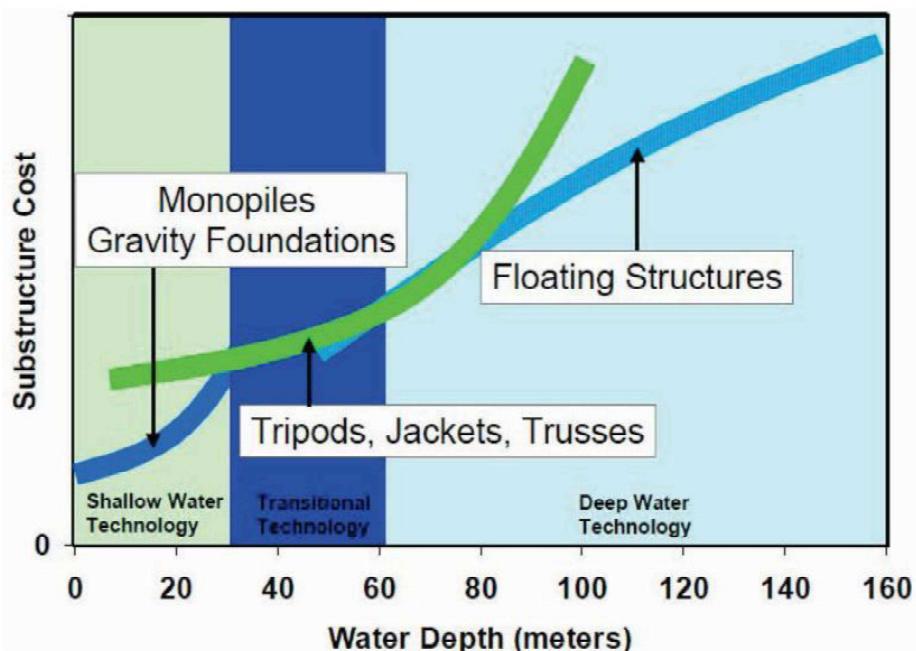


図 4-33 各基礎構造の建設コストと深さの関係

(出典: Musial ら)

図 4-34 に運開年と沿岸からの距離の関係を示す。EU では、年を追うごとにより遠洋での海上風力発電が行われている。ただし、基本的には 50km 圏内で行われており、100km を超えるものは、図 4-25 に示すドイツの BARD offshore(400MW)や Global Tech I(400MW)のものや図 4-35 に示すイギリスの Dogger Bank A~D(各 1200MW)や Hornsea Project One(1218MW)など大容量かつ 1ヶ所に集積している風力発電所であった。このことは、図 4-36 に示す発電容量と沿岸からの距離の関係からも分かる。EU 圏は遠浅の海であることから、今後 EU では大容量かつより遠洋での海上風力発電が増えることが予想される。

日本のデータは図 4-34 に白抜きで示されている。日本では、沿岸からの距離は最長でも 25km 以下となっており、近海で海上風力発電が行われている。日本近海は大陸棚で構成されており、一定以上沿岸から離れると急激に水深が深くなる。そのため、日本において、着床式の基礎構造の風力発電を行う場合、30km 圏内での実施が主となる。表 4-4 に年平均風速 7m/s 以上の水深帯別・離岸距離別期待可採風力量を示す。20~30km 圏における 50m 以浅の風力可採量が 20km 圏内、50m 以浅の風力可採量に比べて極端に少ないことが分かる。日本の場合、今後は 30km 圏内の開発の活発化または浮体式の海上風力発電の開発が重要となることが予想される。

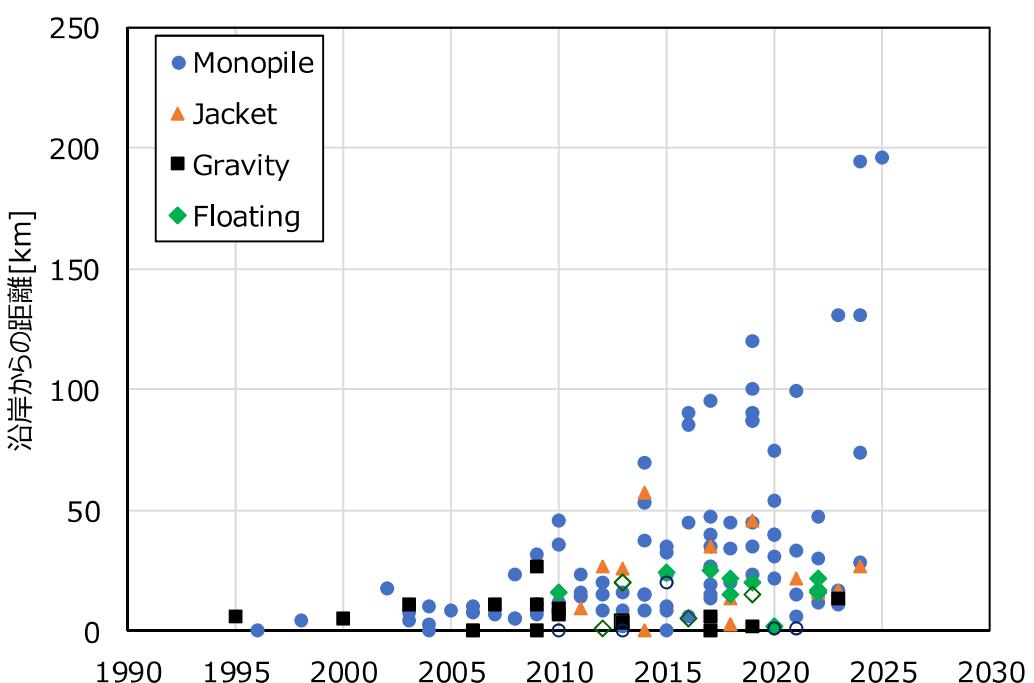


図 4-34 運開年と沿岸からの距離の関係(白抜きは日本)

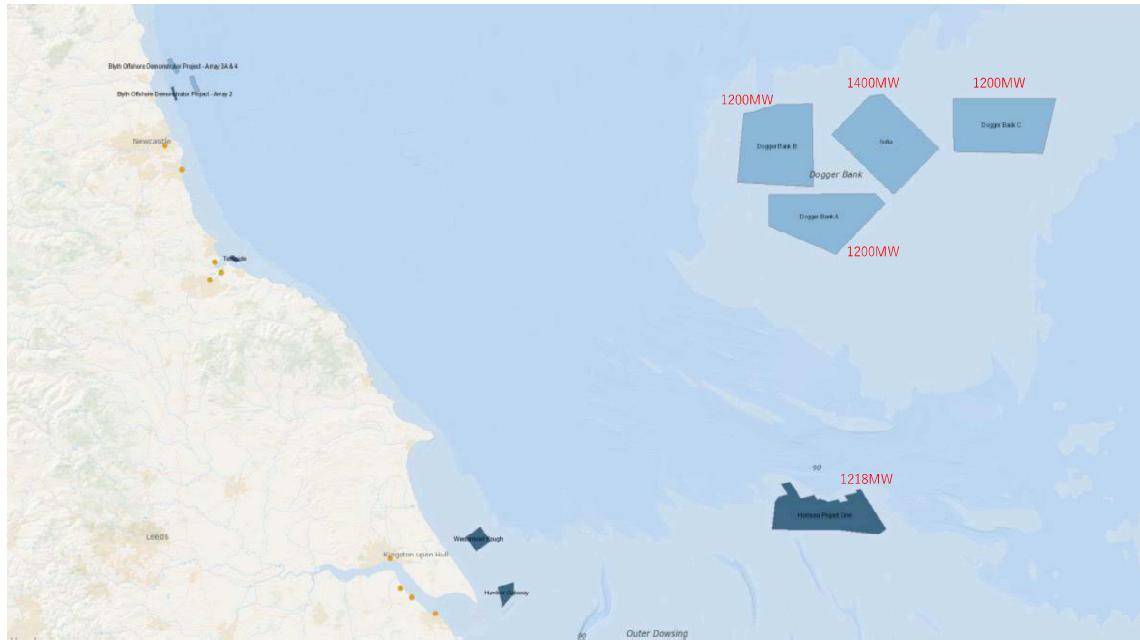


図 4-35 イギリスの沿岸から 100km を超える洋上風力発電所  
(出典:4C Offshore)

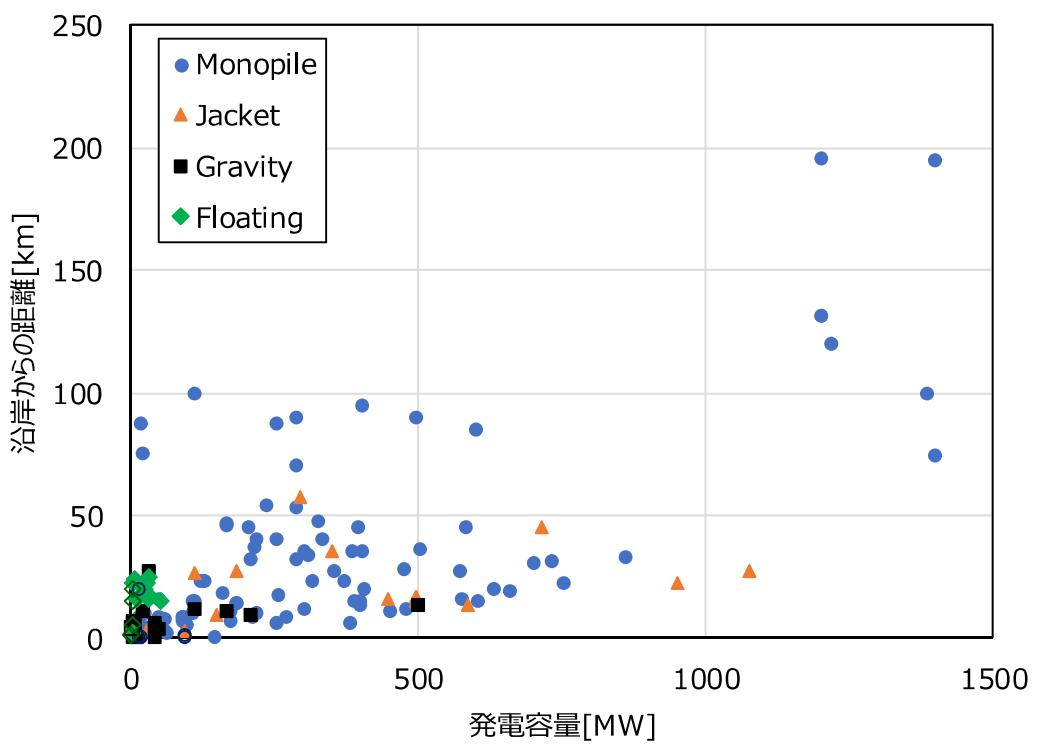


図 4-36 発電容量と沿岸からの距離の関係(白抜きは日本)

表 4-4 年平均風速 7m/s 以上の水深帯別・離岸距離別期待可採風力量の推計結果

水深帯(m)	離岸距離						設置基数	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)		
	0-10km			10-20km						20-30km			0-30km								
0-20	3,429	17,145	34,290	655	3,275	6,550	82	410	820	4,166	20,830	設置基数	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	
20-30	2,206	11,030	22,060	694	3,470	6,940	104	520	1,040	3,004	15,020	30,040	41,660	117	84	84	84	84	84	84	
30-50	4,972	24,860	49,720	1,893	9,965	18,930	611	3,065	6,110	7,575	37,875	75,750	214	214	214	214	214	214	214	214	
50-100	12,020	60,100	120,200	14,443	72,215	144,430	5,317	26,585	53,170	31,779	158,895	317,790	889	889	889	889	889	889	889	889	
100-200	9,573	47,865	95,730	17,288	86,440	172,880	18,802	94,010	188,020	45,663	228,315	456,630	1,284	1,284	1,284	1,284	1,284	1,284	1,284	1,284	
<b>0-200</b>	<b>32,200</b>	<b>161,000</b>	<b>322,000</b>	<b>35,073</b>	<b>175,365</b>	<b>350,730</b>	<b>24,916</b>	<b>124,580</b>	<b>249,160</b>	<b>92,189</b>	<b>460,945</b>	<b>921,890</b>	<b>2,788</b>								
(注) 年平均風速: ≥7m/s、風況マップ: 海面上60m高のデータベース、風車: 2MW5基/km <sup>2</sup> 、発電量: 風速7.5m/sで許備利用率31%、8.5m/sで37.8%、9.5m/sで44.8%、10.5m/sで51.9%から推計																					
水深帯(m)	離岸距離						設置基数	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)		
	0-10km			10-20km																20-30km	
0-20	6,114	12,228	61,140	713	1,426	7,130	82	164	820	6,909	13,818	設置基数	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	面積(km <sup>2</sup> )	設備容量(MW)	
20-30	3,214	6,428	32,140	807	1,614	8,070	104	208	1,040	4,126	8,252	41,260	41,260	41,260	41,260	41,260	41,260	41,260	41,260	41,260	
30-50	7,420	14,840	74,200	2,230	4,472	22,360	622	1,244	6,220	10,278	20,556	102,780	297	297	297	297	297	297	297	297	
50-100	17,714	35,428	177,140	18,247	36,494	182,470	6,306	1,2612	63,060	42,267	84,534	422,670	1,203	1,203	1,203	1,203	1,203	1,203	1,203	1,203	
100-200	12,878	25,756	128,780	21,076	42,152	210,760	22,552	45,104	225,520	56,505	113,010	565,050	1,616	1,616	1,616	1,616	1,616	1,616	1,616	1,616	
<b>0-200</b>	<b>47,340</b>	<b>94,680</b>	<b>473,400</b>	<b>43,079</b>	<b>86,158</b>	<b>430,790</b>	<b>29,666</b>	<b>59,332</b>	<b>296,660</b>	<b>120,085</b>	<b>240,170</b>	<b>1,200,850</b>	<b>3,743</b>								
(注) 年平均風速: ≥7m/s、風況マップ: 海面上80m高のデータベース、風車: 5MW2基/km <sup>2</sup> 、発電量: 風速7.5m/sで許備利用率31%、8.5m/sで37.8%、9.5m/sで44.8%、10.5m/sで51.9%から推計																					

(出典:長井ら)

#### 4.3.3. EUにおける洋上風力発電プロジェクト事例

##### (1) EUプロジェクト

欧州委員会(European Commission)の下で行われた 3 つの国家プロジェクトの報告書の概要をまとめた。3 つの国家プロジェクトは、洋上風力の基礎知識、基本情報を整理するプロジェクト Wind Energy – the Facts II プロジェクト、洋上風力のコスト削減を目的に行われた Lean Wind プロジェクト、浮体式洋上風力を主として洋上風力の課題を整理した ETIP Wind プロジェクトである。

##### 1) Wind Energy – the Facts II プロジェクト

Wind Energy – the Facts II プロジェクトは 2004 年に実施された風力発電の基礎知識、基礎情報を盛り込んだファクトシートを作成する Wind Energy – the Facts I プロジェクトに引き続き、内容の更新と詳細化を目指して 2007 年から 2009 年に掛けて行われた後継プロジェクトである。このプロジェクトの報告書は第 1 章技術、第 2 章グリッド、第 3 章経済性、第 4 章市場、第 5 章環境、第 6 章シナリオと目標という 6 章構成になっている(出典:Wind Energy The Fact)。これを整理し、特に洋上風力について言及している部分についてまとめた。

##### ① 第 1 章 技術

ここでは、洋上風力発電を開始するにあたり、技術面でどのような点に気を付ける必要があるのか記載されている。最初に可採風力量の調査から行い、流氷、波浪、雷など地域の気象条件も想定したメンテナンスも含めた運用計画の策定、サイト選定とタービンの選定と設置レイアウト、基礎構造の選択など洋上浮力発電の設計、変電所位置やケーブルレイアウトなど技術的観点で入念に準備が必要であると記載されている。

##### ② 第 2 章 グリッド

ここでは、風力発電がグリッドにより入り込み、普及するための条件について記載されている。まず、条件の 1 つとして、地域の需要を超えた発電容量を設置しないこと(特に陸上風力発電)が挙げられている。次に日中、季節の需要と供給を上手くバランスし、グリッドを管理するために、バックアップの用意と最新の予測、監視、および通信技術の活用が述べられている。バックアップについては、電気分解やスーパーキャパシタなども想定されている。その他の条件として、グリッドの強化がある。グリッド容量の増強を行うと共に、より効率的に電力を輸送するため、送電圧の向上と国家間のグリッドの接続強化が必要である。

##### ③ 第 3 章 経済性

陸上風力発電にフォーカスし、導入コストや発電コストについて言及されている。陸上風力の場合、ほとんどがタービンコストであることを述べている。

##### ④ 第 4 章 市場

本章では、風力発電の市場性について言及している。EU での再生可能エネルギーの使用レベルを義務付ける再生可能エネルギー指令 2009/28/EC が後押ししていることもあり、今後も市場が増え、それに伴ってタービンなども技術開発が進んでいくことが予想されている。一方で、洋上風力発電に限定した場合、多くの国で現在の海事政策の枠組みでは海上での電力生産が難しい

という課題がある。日本においても、再エネ海域利用法が整備されたのは平成 30 年になってからである。

## ⑤ 第 5 章 環境

第 5 章では、陸上風力と洋上風力、既存の EU の発電の環境影響の比較を行っている。図 4-37 に比較結果を示す。風力発電は、既存の EU の発電と比較して温暖化ガス発生量や廃棄物など多くの点で環境への負荷が低いことが分かる。また、陸上と洋上の比較では、洋上の方が僅かに廃棄物の発生が少なく、海での操業である分、水への環境負荷が僅かに高かった。

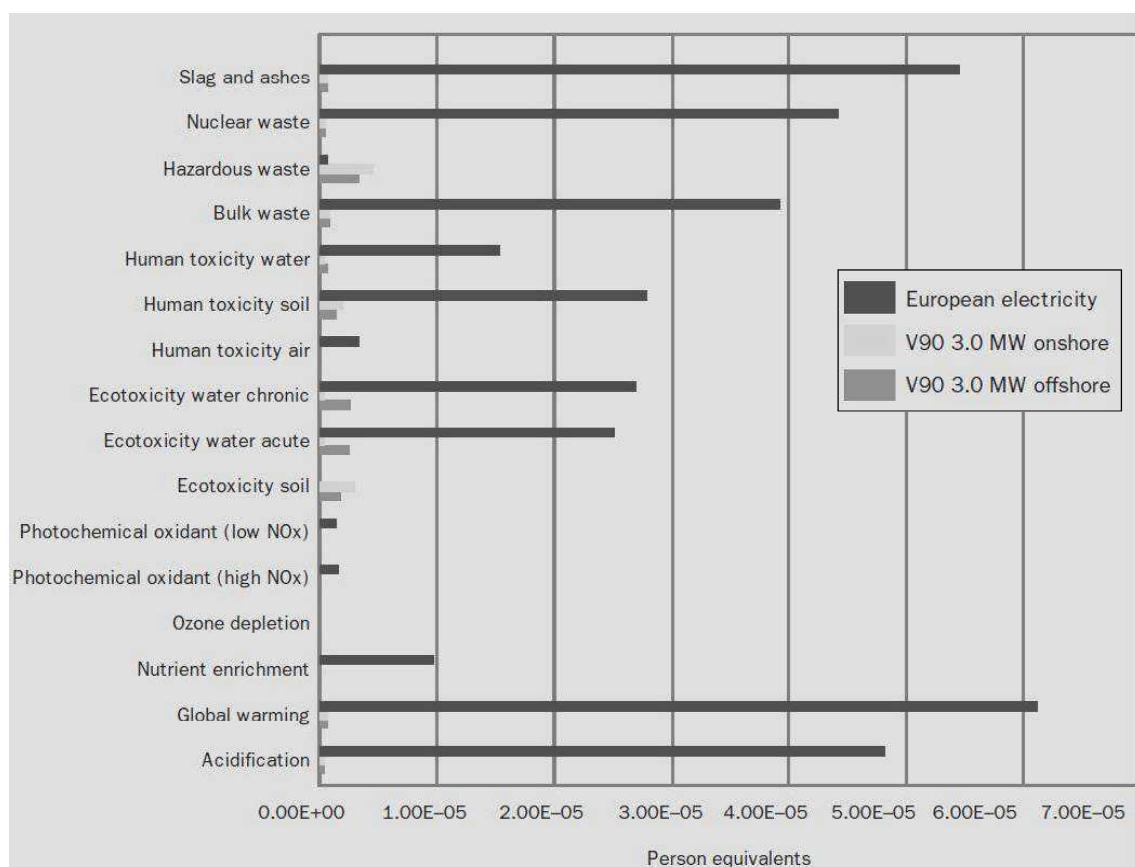


図 4-37 陸上風力と洋上風力、既存の EU の発電の環境影響の比較

## 2) ETIP Wind プロジェクト

The European Technology & Innovation Platform on Wind Energy (ETIP Wind) は 2016 年に設立された風力に関する政策と研究開発について情報発信を行うと共に、ヨーロッパにおける指針や勧告を示すプラットフォームである。ETIP Wind からは、1.5°Cシナリオを満たすには今行動を起こす必要があることから、2027 年までを 2020-2022 の短期、2023-2024 の中期、2025-2027 の長期に分割し、風力発電ロードマップが示されている(出典: ETIP Wind)。ロードマップはグリッドシステム、オペレーションとメンテナンス、次世代技術、海上風力、浮体式海上風力、スキルと人的資源の 6 項目について出されており、更にそれぞれの項目内で優先順位も付けている。以下、その概要について紹介する。

### ① グリッドシステム

グリッドシステムでは、グリッドシステムのハード、ソフト両面での強化が必要とされている。ハード面では、蓄電池の導入や水電解装置など Power to X の導入による電力供給安定性の強化がある。ソフト面では、太陽光などその他の再生可能エネルギーと共に欠点を補いながら運用する手段や仮想発電所の導入などがある。また、現在のグリッドシステムでは従来の発電システムに基づいて要件が出されているが、グリッドシステムの在り方そのものを見直すことも重要と記載されている。グリッドシステムのロードマップを表 4-5 に示す。

表 4-5 グリッドシステムのロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 電力需給の最適マッチング</li><li>➢ 蓄電池投入による短期電力貯蔵</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 仮想発電所導入による柔軟性強化</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 100%再生可能エネルギーでも安定したグリッド</li></ul>
中	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ Power to X による長期の電力貯蔵</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 太陽光、蓄電池、水電解装置等とも組み合わせた柔軟性強化</li><li>➢ グリッドからの要件の改訂</li></ul>	-
低	<ul style="list-style-type: none"><li>➢ 同事業所内でも現場気象条件に合わせたタービンを設置</li><li>➢ 電力品質の確保</li></ul>	-	-

### ② オペレーションとメンテナンス

風力発電は様々な気象条件に曝されており、機器能力の最大化のためにメンテナンスが重要である。このメンテナンス、運用、気象など環境条件の把握や寿命の判断などを技術開発だけでなく人工知能やビッグデータ活用により最適化する取り組みが必要である。また、風力発電所は人里離れたところにあることが多いため、人と物の配置の最適化も必要である。オペレーションとメンテナンスのロードマップを表 4-6 に示す。

表 4-6 オペレーションとメンテナンスのロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 特に風車、基礎構造などの寿命判断方法の確立</li> <li>➤ 監視制御用ツール</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ デジタル化による最適運用</li> <li>➤ 環境条件の把握</li> <li>➤ ケーブル補修方法の確立</li> </ul>	-
中	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 効率と安全性向上のため、ロボット検査と修理方法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 運転停止判断条件の最適化</li> <li>➤ 廃棄戦略とその技術の開発</li> </ul>	-
低	-	-	-

### (3) 次世代技術

タービンの大型化と高効率化を行うために、高耐久性、軽量の新素材の開発やタービンの設計などを行う必要がある。そして、合わせて開発された大型高効率タービンを高精度に大量生産する技術の開発が必要である。また、製造された大型装置を目的地まで運ぶ手段(大型輸送船など)についても開発していく必要がある。

その他、素材開発、技術開発は希土類に頼らないことやリサイクルも想定して実施していく必要がある。リサイクルでは、特にガラスや炭素繊維、磁性材料などの重要な材料を回収する技術の開発が必要である。

最後にこれらを一貫して共通技術については基準化を図っていく必要がある。

表 4-7 次世代技術のロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 風車や材料などの開発</li> <li>➤ 社会環境や自然環境への配慮(技術開発、基準作り、PA対応)</li> <li>➤ 風車の羽のリサイクル技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 共通技術の基準化</li> <li>➤ 製造プロセスデジタル化によるコスト低減</li> <li>➤ 炭素繊維などによる風車の羽の軽量化</li> <li>➤ 持続可能な材料開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 材料、部品のリサイクル方法の確立</li> </ul>
中	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 大型部品の輸送方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ センサー技術と機器診断技術の開発</li> <li>➤ 故障メカニズム把握による部品信頼性の向上</li> <li>➤ 大型化に合わせた発電機の開発</li> <li>➤ ノイズの低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 低出力ローターや永久磁石を用いない高電圧発電機など破壊的技術の開発</li> </ul>
低	-	-	-

#### ④ 洋上風力

洋上風力普及のためには、インフラストラクチャの整備と標準化が重要である。インフラストラクチャでは、設置、操業やメンテナンスの際必要となる港湾の整備と大型風車を輸送、設置するための作業船の開発、ケーブルの整備などがある。また、設置したケーブルについては、メンテナンスを行っていく必要がある。そして、ケーブルとグリッドの接続部など基礎的な共通技術については標準化を図っていく必要がある。その他、バランスシートの改善についても意識していく必要があることを述べている。

表 4-8 洋上風力のロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 最適なケーブルの利用とそれの監視と補修技術の活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 部品や基礎構造などの標準化によるコストと調達期間の低減</li> <li>➤ 開発費の半分を占めるプラントコストについて、廃棄まで含めて設計を見直し、バランスシートを改善</li> <li>➤ 事業の最適な設計と運用を行うための検証方法の確立</li> </ul>
中	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ コスト削減のため、基礎構造の標準化</li> <li>➤ 運用データの情報交換の促進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 基礎構造の耐久性向上による監視と補修コストの低減</li> <li>➤ 共通部品の標準化</li> </ul>	-
低	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 廃棄用作業船の開発と廃棄方法の検討</li> </ul>

#### ⑤ 浮体式洋上風力

浮体式洋上風力を普及させるためには、まず風力資源の把握と各環境とマーケットに最適な設計を行うことである。特に浮体に関して事業ごとに設計を行う必要があるため、低コストで高性能、簡単に大量生産できる設計にし、標準化できる部品は標準化していくことでコスト低減を図っていく必要がある。それから、港湾整備や作業船などのインフラストラクチャを整える必要があり、それらを使って設置とメンテナンスを行う方法についても検討していく必要がある。また、風力資源の把握も重要となってくる。

その他、技術開発も必要であり、波浪の影響を受けやすい浮体式では、回転部分の機器強度が重要になってくる。100m 以深になれば、海底ケーブルの敷設方法まで重大な検討事項となってくる。

表 4-9 浮体式洋上風力のロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 共通技術、部品の標準化</li> <li>➤ 浮体を含め、全体/詳細設計を行うためのツールを検討</li> <li>➤ 取扱いが簡単なアンカーとその状態監視方法の開発</li> <li>➤ 浮体式に最適なケーブルとその設置方法の開発</li> <li>➤ 波浪影響に耐える部品および機器開発</li> </ul>	-	-
中	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 各部品を統合し、最適化を行い、パフォーマンスの最大化を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ パフォーマンス最大化のための、プラント制御アルゴリズムの開発</li> </ul>
低	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 設置やメンテナンスのための作業場(作業船など)の開発</li> </ul>	-

#### ⑥ スキルと人的資源

今後、風力発電を更に普及させていくためには、必要なスキルが獲得できる資格プログラム(職業訓練など)が必要である。そして、それは相乗効果を得る必要があり、そのためには、例えば洋上風力の場合、石油・ガスなどの海洋エネルギー部門など他部門との対話が必要となってくる。また、陸上風力の場合、炭鉱夫などの再雇用なども想定して職業訓練なども行っていく必要がある。こういった動きには学術分野の参画が重要であり、そのためには、風力の学位の制定、複数年の助成金を獲得、学術分野への情報提供などを行うことで、人材の確保を行っていくことが大事である。

表 4-10 技術と人的資源のロードマップ

優先度	短期(2020-2022)	中期(2023-2024)	長期(2025-2027)
高	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 作業場での労働力確保と能力底上げ</li> <li>➤ 学術分野での人材確保と能力底上げ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 風力に関する教育活動の強化(人材と資金の投資)</li> </ul>	-
中	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 産学連携の教育プログラムの実施</li> </ul>	-
低	-	-	-

(2) ヨーロッパ論文

1) 洗堀予測と洗堀防止方法に関する論文

① 要約

ヨーロッパの洋上風力の事例を総括し、洗掘状態の評価方法と洗掘防止の目指すべきところをまとめている。(出典:Matutano ら)

② 調査対象の洋上風力サイト

基本的には、ヨーロッパでの主力であるモノパイル式の洋上風力施設が調査対象となっている。重力式(石油洋上プラットフォームのようなもの)は、Thornton Bank と Nysted の2箇所であった。図 4-38 と表 4-11 に調査対象の各洋上風力発電サイトの位置情報と施設情報、海域情報をそれぞれ示す。

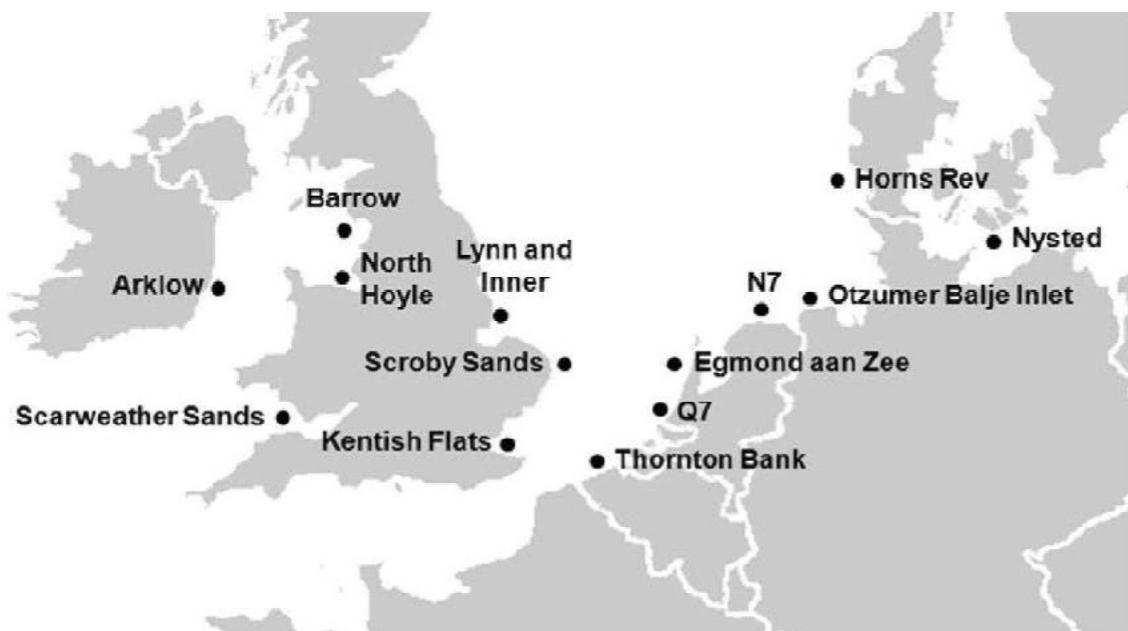


Fig. 2. Location of European wind farms studied. Own research.

図 4-38 ヨーロッパ洋上風力総括に用いられたサイト

表 4-11 各洋上風力発電サイトの施設情報と海域情報

Table 1

Characteristic wind farm information (NA: Information not available). Own research.

Name	Year installed	Type of foundation	Monopile diameter [m]	Number of turbines	Nominal capacity of turbines [MW]	Water depth [m]	Significant wave ( $H_s$ [m])	Peak period ( $T_p$ [s])	Peak current speed ( $U_m$ [m/s])
N7 (Germany)	1997	Monopile	6	1	NA	7	4.6	16.1	1.3
Horns rev (Denmark)	2002	Monopile	4.25	80	2	6–14	5.2	NA	NA
Scarweather sands (UK)	2002	Monopile	2.2	30	3.6	6	3.6	6	1.1
Oitzumer baie inlet (Germany)	2003	Monopile	1.5	1	NA	11.7	NA	NA	1.4
North hoyle (UK)	2003	Monopile	4	30	2	7–11	4.78	6.8	1.17
Scroby sands (UK)	2004	Monopile	4.2	30	2	3–12	2.25	NA	1.65
Arklow bank (Ireland)	2004	Monopile	5	7	3.6	2.6	5.6	NA	2
Nysted (Denmark)	2004	Gravity based	10.5–16	72	2.3	6–9.5	NA	NA	NA
Kentish flats (UK)	2005	Monopile	5	30	3	3–5	4.88	NA	0.9
Barrow (UK)	2006	Monopile	4.75	30	3	12–18	4.9	NA	0.8
Thornton bank (Belgium)	2006	Gravity based	6.5–17	60	5	10–24	6.32	11.06	1.2
Egmond aan zee (Netherlands)	2007	Monopile	4.6	36	3	16–21	3.6	8	0.6
Lynn and inner dowsing (UK)	2007	Monopile	4.74	54	3.6	6–13	2.38	7.03	0.9
Princess amalia (Q7) (Netherlands)	2008	Monopile	4	60	2	19–24	7.7	9.7	1.3

### ③ 洋上風力の建築条件

ヨーロッパの洋上風力施設がどのような場所に建築されているのかまとめている。海域での建築物の区分を行うパラメータ  $H_o$  を洋上風力に適用すると、 $H_o$  値が 6~15 の領域になるように建築されている。 $H_o$  値は波の最大高さ  $H_s$  と捨石、砂利、砂など敷設材の嵩密度  $\Delta (= \rho_r / \rho_w - 1, \rho_r = 2650 kg/m^3, \rho_w = 1025 kg/m^3)$  と平均粒径  $D_{50}$  を用いて計算される。

$$H_o = H_s / (\Delta \cdot D_{50})$$

なお、 $D_{50}$  をどの様に定義するかは、平均重量  $W_{50}$ 、密度  $\rho_s$  を用いて、以下の式で示されている（出典：CONSTRUCTION INOUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION）。

$$D_{50} = \left( \frac{W_{50}}{\rho_s} \right)^{1/3}$$

ここで、各洋上風力発電サイトのパイ尔と波高、敷設材径、 $H_o$  値については、表 4-12 のとおりである。なお、洋上風力発電の構造物とその他海域構造物の  $H_o$  値の比較は図 4-39 のとおりである。

表 4-12 各洋上風力発電サイトのパイ尔と波高、敷設材径、 $H_o$  値

Table 8

Values of  $H_o$  of European wind farms studied. Own research.

Name	Monopile diameter [m]	$H_s$ [m]	$D_{50}$ [m]	$H_o = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{50}}$
Horns rev	4.25	5.20	0.40	8.20
North hoyle	4	4.78	0.30	10.05
Scroby sands	4.2	2.25	0.15	9.46
Arklow bank	5	5.60	0.42	8.31
Thornton bank	6.5–17 (GBS)	6.32	0.35	11.39
Egmond aan zee	4.6	3.60	0.40	5.68

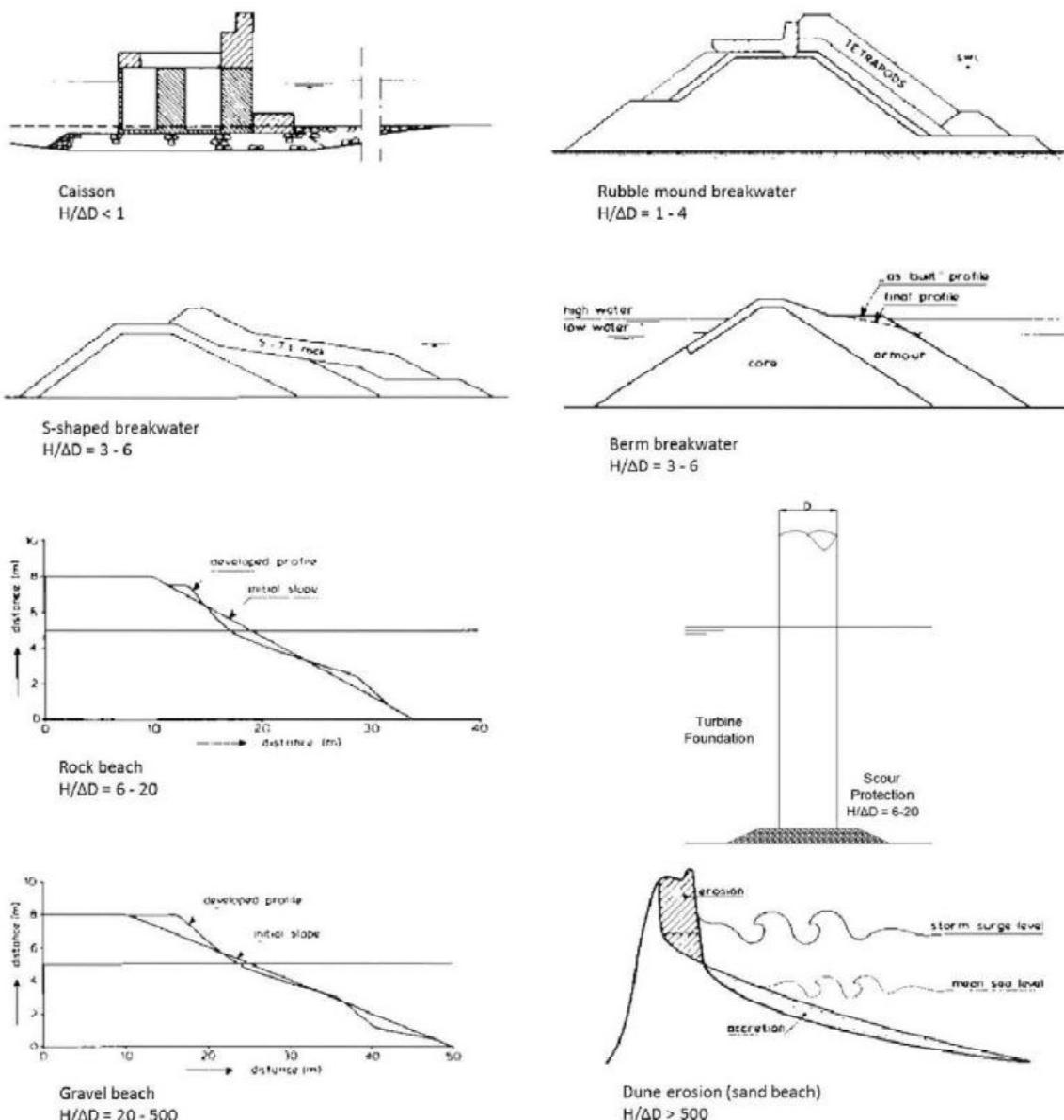


Fig. 4. Proposed classification for offshore wind turbine foundations. Modified from Ref. [12].

図 4-39 洋上風力発電の構造物とその他海域構造物の  $H_o$  値の比較

#### ④ 洋上風力で発生する洗掘について

洗掘箇所の最大洗掘深さと洗掘範囲について理論式が提示されている。

#### 最大の洗掘深さ

既往の文献から最大洗掘深さ  $S_{max}$  は表 4-13 のように理論式がある。各風力発電サイトにおける最大洗掘深さの理論値と実際の報告値の比較を表 4-14 に示す。

表 4-13 最大洗掘深さの理論式

**Table 2**  
Scour depth prediction, main formulae. Own research.

Authors	Year	Flow conditions	Maximum scour depth prediction
Breusers et al. [6]	1977	Steady current	$\frac{S}{D} = 1.5 \cdot D \cdot \tanh\left(\frac{h}{D}\right)$
Zanke [16]	1982	Steady current or waves	$\frac{S}{D} = 2.5 \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{u_C}{U}\right)$
Melville et al. [17]	1988	Steady current	$\frac{S}{D} = KC - 6$
Sumer et al. [18]	1992	Steady current or waves	$\frac{S}{D} = 2.4$
Richardson and Davis (HEC-18) [19]	1995	Steady current	$\frac{S}{h} = 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$
Sumer et al. [5]	2002	Steady current and waves	$\frac{S}{D} = 1.3 \cdot (1 - \exp(-A(KC - B)))$
Zanke et al. [20]	2011	Steady current and waves	$\frac{S}{D} = 2.5 \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{u_C}{U}\right) \cdot x_{rel}$

表 4-14 各風力発電サイトにおける最大洗掘深さの理論値と実際の報告値の比較

**Table 6**

Values of maximum scour estimations by the application of different formulae (from Refs. [6] and [21]) and available scour data of European wind farms studied (from Refs. [35–38]). Own research.

Name	Monopile diameter [m]	Estimated scour [m]		Available scour data [m]	
		$S_{max}$ (Breusers) [6]	$S_{max}$ (S&F, DNV) [21]	$S_{max}$	$S_{max}$
N7	6	7.41	7.80	1.05D	6.30
Scarweather sands <sup>a</sup>	2.2	3.30	2.86	0.59D	1.30
Otzumer balje inlet <sup>d</sup>	<b>1.5</b>	<b>2.25</b>	<b>1.95</b>	<b>1.47D</b>	<b>2.21</b>
North hoyle	4	5.87	5.20	0.125D	0.50
Scroby sands	<b>4.2</b>	<b>5.96</b>	<b>5.46</b>	<b>1.66D</b>	<b>6.97</b>
Arklow bank	5	6.25	6.50	0.86D	4.00
Kentish flats	5	7.10	6.50	0.46D	2.30
Barrow	4.75	7.10	6.18	1.21D	5.74
Egmond aan zee	4.6	6.90	5.98	0.48D	2.2
Princess amalia (Q7)	4	6.00	5.20	1.075D	4.30

<sup>a</sup> Met Mast data.

## 洗掘範囲

洗掘範囲  $L_s$  は下記理論式が提示されている。

$$L_s = D + S_e \cdot (\cot(\alpha_{up}) + \cot(\alpha_{down}))$$

ここで、D はモノパイル径、 $S_e$  は平衡洗掘深さ、 $\alpha_{up}$  と  $\alpha_{down}$  は洗掘穴の傾斜である。なお、 $\alpha_{up}$  と  $\alpha_{down}$  については表 4-15 のような報告が出されている。

表 4-15 洗掘穴傾斜の既往の報告

**Table 3**

Different recommendations on the parameters of the scour extension Equation (4.1.1) [25].

Author	Recommendation
Hoffmans and Verheij, 1997 [23]	$\alpha_{up} = \emptyset$ (angle of internal friction) $\alpha_{down} \approx \frac{1}{2} \alpha_{up}$
Sumer and Fredsoe, 2002 [5]	$\alpha_{down} = 25^\circ$

## ⑤ 洗掘防止工の設計

### 洗掘防止工の層厚

洗掘防止工によるマウンドを図 4-40 のように濾過層(Filter layer)と鎧層(Armour layer)で定義し、各洋上風力発電サイトの洗掘防止工の層厚を表 4-16 に示す。

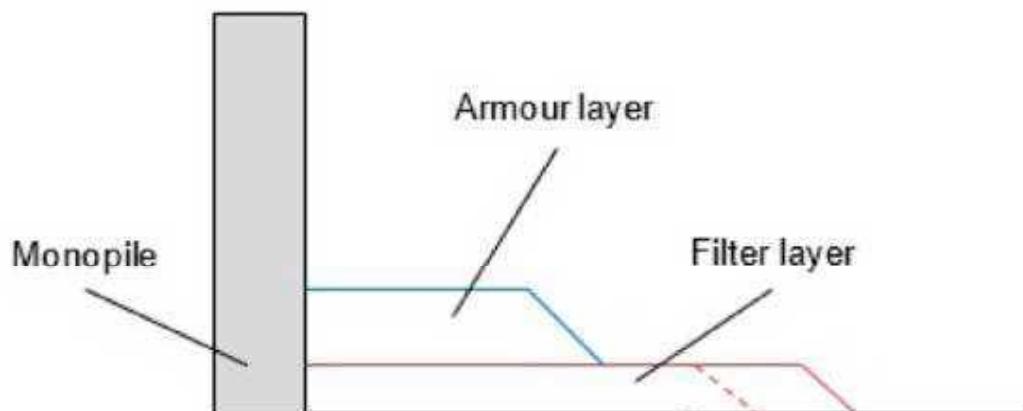


図 4-40 洗掘防止工におけるマウンドの構成

表 4-16 各洋上風力施設の洗掘防止材径と洗掘防止層の厚み

**Table 4**

Stone size ( $D_{50}$ ) and thickness of filter and armour layers present in different wind farms. Own research.

Name	$D_{50}$ [m]	Thickness [m]
North hoyle	0.3	Unknown
Egmond aan zee	0.4	1.4 (armour)
Thornton bank	0.35	0.7
Horn rev	0.2 (filter), 0.4 (armour)	0.5 (filter), 1 (armour)
Scroby sands	0.15	Unknown
Arklow bank	0.425	Unknown

## 洗掘防止工の径

推奨される洗掘防止工の径が既往の文献で示されており、表 4-17 にまとめられている。

表 4-17 推奨される洗掘防止工の径

**Table 5**

Recommendations for calculating the extension of riprap scour protections. Own research.

Author	Scour protection extension ( $L_{ext}$ )
Bonasoundas (1973) [29]	2.5D–4.5D
Hjorth (1975) [30]	2.5D
Breusers and Raudkivi (1991) [31]	3D–4D
Hoffmans and Verheij (1997) [23]	2.5D–4D
Melville and Coleman (2000) [32]	3D–4D
May (2002) [33]	2D

また、洗掘防止工の必要径について理論式がいくつか示されており、それぞれ比較した結果が表 4-18 にまとめられている。なお波長の 1/4 から 1/2 が望ましい洗掘防止工の必要径とされている。

表 4-18 推奨される洗掘防止工の径の理論式による計算結果比較

**Table 7**

Extension of scour protections recommended for different authors in European wind farms studied. Own research.

Name	Monopile diameter (m)	$L_{ext}$ (m)					
			4D ([23,29,31,32])	Cartens (Equation 4.2.2)	DNV (Equation 4.2.3)	Löffler (Equation 4.2.4)	$L/4$
N7	6	24	30.62	15.83	40	32.75	65.50
Scarweather sands	2.2	8.8	13.64	6.82	14.22	12.10	24.21
North hoyle	4	16	24.26	12.16	17.06	13.88	27.76
Lynn and inner	4.74	18.96	28.34	16.33	14.25	14.77	29.55
Egmond aan zee	4.6	18.4	28.50	14.24	23.82	21.75	43.5
Princess amalia (Q7)	4	16	24.80	13.40	34.61	29.82	59.64

## 2) 洗堀の要因に関する論文

### ① 要約

HORNS REV 1 OFFSHORE WIND FARM の事例紹介とそこでの洗堀の要因について検討している。同時に一般的な洗堀の要因についても総括している。(出典:Nielsen ら)

### ② HORNS REV 1 OFFSHORE WIND FARM について

#### HORNS REV 1 OFFSHORE WIND FARM の概要

HORNS REV 1 OFFSHORE WIND FARM の場所はデンマーク沖合にある(図 4-41 参照)。2MW のモノパイル式のタービンが 80 基あり、計 160MW の施設となっている。モノパイル径は 4m である。深度は 6~13m 程度、潮流の流速は基本的には 0.8m/s 以下である。

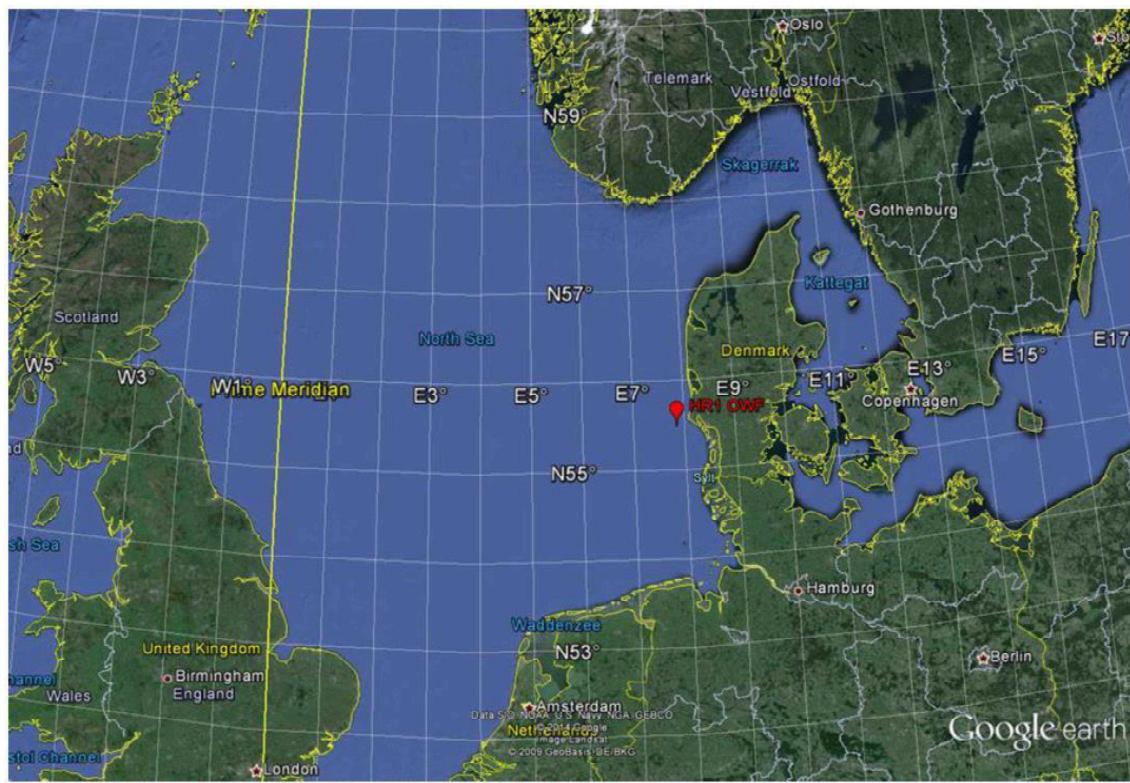


Figure 1. The location of Horns Rev 1 Offshore Wind Farm.

図 4-41 HORNS REV 1 OFFSHORE WIND FARM の場所

### 洗掘防止工について

洗掘防止工は図 4-42 のようにフィルター層 (Filter Layer) と被覆層 (Cover layer) で構成され、それぞれの設計は表 4-19 のようになっている。フィルター層の厚みは 0.5m、被覆層は石 2 個分の厚みである。洗掘防止工径はモノパイプの 6 倍程度 (24m 程度) としている。材料は、フィルター層は海から、被覆層は採石場からそれぞれ調達している。それぞれの粒径は下表に示す。なお、洗掘防止工部分が乗っている基礎部分つまり海底の粒径は 0.1~1.0mm 程度である。

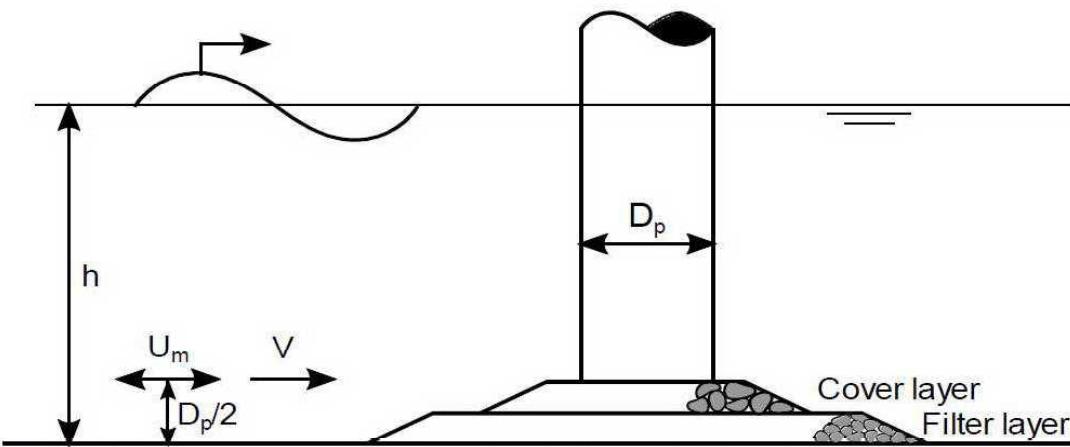


Figure 2 Sketch of the scour protections at Horns Rev 1 Offshore Wind Farm. Not to scale.

図 4-42 洗掘防止工の概略図

表 4-19 洗掘防止工の材料粒径

Table 1. Sizes of the applied stones for the scour protections.			
	Minimum size [m]	Median size [m]	Maximum size[m]
Filter layer	0.03	0.10	0.20
Cover layer	0.35	0.40	0.55

### 事前調査

建設する前に周辺海域の推進や地形図について事前調査を行っている。調査は 1998 年から 2001 年に掛けて毎年行い、2002 年から建設を開始している。

建設中も調査を行っており、フィルター層建設前後、被覆層建設後、追加フィルター層建設後、追加被覆層建設後の計 5 回行っている。

また、建設後、2005 年にフォローアップの調査も行っている。

### 海域データ

洗掘の要因検討のため、周辺海域の潮流や波高、気象等のデータが必要である。観測点の無い部分のデータも必要であるため、これらは数値モデルによって入手した。実データとの比較で正確性は確認している。

### ③ 洗掘の一般情報

#### 洗掘の発生原因

洗掘穴は洗掘防止工部分が取り除かれるから発生するのではなく、洗掘防止工部分が乗っている基礎部分(0.1~1.0mm の堆積物)つまり海底が潮流、波、波と潮流の組み合わせ、碎波などによって取り除かれ、沈みこみが発生するため、洗掘穴が発生する。

## **潮流の影響**

潮流は洗掘防止工部分において 2 つの馬蹄形渦に分割され、洗掘防止工部分内にある馬蹄形渦が海底堆積物を取り除き、沈み込みが発生する。ただし、洗掘防止工部分層厚がモノパイ尔径の 0.8 倍あればこの影響は小さくなる。

## **波の影響**

波による影響は、波によって基礎部分が取り除かれる影響と波によって外から基礎部分が追加される影響の2つがあり、波による追加の影響の方が大きい。ただし、波による追加の発生時期と波による基礎部分除去の時期にはタイムラグがあり、基礎部分除去の時期の方が早く発生するため、沈み込みが発生する。これへの対策は、洗掘防止工部分の穴に堆積物を予め充填しておくことである。

洗掘防止工部分の厚みが厚くなると、外から来た堆積物が中に入り難くなり、波による追加の効果が遅くなる。そのため、洗掘防止工の層厚は薄いものよりも厚いものの方がより大きな洗掘が発生する。

洗掘防止工の径が大きくなると外部からの堆積物の流入がパイ尔付近に届きにくくなるため、洗掘し易くなる。

## **波と潮流の組み合わせの影響**

波と潮流の組み合わせの影響については、現状情報が無い。ただし、洗掘防止工上部の流速と内部の流速には速度差があるため、この速度差によって洗掘防止工内部に上方向の流れが生じ、それによって基礎部分の流出が発生する。

## **碎波の影響**

波が碎かれた時に乱流が発生し、その乱流がモノパイ尔によって下方へ導かれる。ただし、この乱流は洗掘防止工の孔隙によって搔き消され、基礎部分の流出には繋がらない(孔隙は小さいほど良い)。むしろ、この乱流による堆積物の追加効果の方が大きい。

注)これらの効果は洗掘防止工が乱流によって壊されないことを前提としたものである。

## **④ HORN'S REV 1 OFFSHORE WIND FARM における沈み込みの原因**

- ・モデル計算では潮流が大きな要因とされているが、潮流モデルではそこまで早い潮流はないため、今回の場合は原因ではない。
- ・各深度における各洗掘度合い(1-V2005/V2002)のモノパイ尔数を表 4-20 に示す。深度と洗掘度合いを比較すると深度が浅いところほど洗掘度合いが大きいことから、波や波と潮流の組み合わせの影響が大きいことが分かった。

表 4-20 各深度における各洗掘度合い( $1-(V_{2005}/V_{2002})$ )のモノパイ尔数

Table 2. Number of scour protections for different water depths and damage levels.			
	6 m < h ≤ 8 m	8 m < h ≤ 10 m	10 m < h ≤ 14 m
$1-(V_{2005}/V_{2002}) < 0.2$	0	15	12
$0.2 \leq 1-(V_{2005}/V_{2002}) < 0.3$	10	16	6
$1-(V_{2005}/V_{2002}) \geq 0.3$	10	8	1

注)  $1-(V_{2005}/V_{2002})$  が大きい程洗掘度合いが大きい

- ・洗掘防止工の初期体積と洗掘度合いを比較すると初期体積が大きいところはより洗掘されることが分かる。

### (3) 洋上ウインドファーム及び周辺産業の状況

大規模洋上風力発電の建造・オペレーションの先進事例として、ヨーロッパの電力会社、政府系企業、民間団体、ケーブルや基礎工事の会社における洋上風力発電に関する動向について調査した(出典:一般社団法人海洋産業研究会)。調査先は、Vattenfall、Carbon Trust、Team Humber Marine Allianc(THMA)、JDR Cable system、SPT Offshoreなどである。

Vattenfall はスウェーデンのストックホルムに本社を置く大手多国籍電力会社である。ここでは、地元漁協との関わり合い方や地域への波及効果についてヒアリングを行っていた。地元漁協に対し特に入域制限は行っておらず、工事計画の公示を行うだけの対応を行っている。また、100 基以上のタービンを運用する場合、日々のメンテナンスは重要であり、沖合で作業する技術者は基本 46 名で工事やメンテナンス内容によって各地から招集される。一方、オフィスには 20 名が在勤しており、地元からも一定の雇用が行われていた。

Carbon Trust は、低炭素社会の実現を目指す関連産業のビジネス化を目指して、英国政府が設立した非営利の独立企業である。共通技術の基準策定についてヒアリングを行っており、視察時点で進行中のプログラムは、アクセス、ケーブル、エレクトロシティ、基礎、Wake の 5 つであった。その他、漁業協調、海洋産業との共存についてもコメントを受けており、漁業、海運、オイル&ガスなどの他の海洋産業との共存は、これらの利害関係者との積極的な関係を維持することは非常に重要であること、共存が維持されない場合、洋上風力発電事業は将来にわたり高いリスクとなるということであった。漁業協調に関してイギリスでは「Fishing Liaison with offshore wind and wet renewables group(FLOWW)」が 2002 年に設立され、「洋上再生可能エネルギー開発のための FLOWW ベストプラクティスガイド」を作成している。そのため、特に漁業補償に関して法的根拠はないが、一般的に 3 年分の商業保証が受け入れられている。

THMA は 2008 年に設立された民間の非営利組織で、洋上風力サプライチェーンを構成する 230 以上の企業が会員となっている。この紹介で Humber 港を見学している。Humber 港はイギリスで最大の港湾施設であり、ヨーロッパでも 4 番目に大きな貿易港である。この港があることでオランダ、ドイツ、デンマークの洋上風力サイトの建設やメンテナンスを可能にしている。

JDR Cable system は、電源ケーブルの設計と製造を行う老舗企業である。ここでは、海底ケーブルの磁場が生物に与える影響についてヒアリングを行っており、サーモンに関しては既に調査結果が出ているとコメントを得ている。

SPT Offshore は 1997 年に設立されたサクションパイル基礎やアンカーの専門会社であり、オイル&ガスや再生可能エネルギー分野で、500 以上のサクションパイルを設置した実績を有する。ここで、日本へのサクションパイル設置の可能性についてヒアリングを行い、設置のためには液状化対策が必要であることを述べていた。

以上をまとめると、表 4-21 のように地元や海洋産業との共存、基準作り、港湾などインフラの整備、技術開発が重要であると考えられる。

表 4-21 欧州洋上風力発電視察結果

分野	コメント	訪問先
地元/海洋産業との共存	➤ 日々のメンテナンス、オフィスワークにより、地元雇用の創出	Vattenfall
	➤ 利害関係者との共存が重要	Carbon Trust
	➤ 漁業補償は 3 年分(ベストプラクティスガイドがある)	
	➤ 海底ケーブル磁場の影響	JDR Cable system
基準作り	➤ 共通技術の基準作り	Carbon Trust
インフラ(漁港整備)	➤ 貿易港、港の重要性	THMA
技術開発	➤ 日本特有の課題に合わせた技術開発(台風、地震など)	SPT Offshore

#### 4.3.4. EU における洋上風力発電の課題

EU における洋上風力発電の課題については、特に 4.3.3(1)2)に記載されている。ここで示された課題について 4.2.2 で示された日本における洋上風力発電の課題と比較しながらまとめていく。

まず、風力全般に係ることであるが、グリッドの強化(系統制約の解消)が重要である。グリッドそのものを強化することも重要であるが、蓄電池、水電解装置の導入や仮想発電所の導入によってグリッドに柔軟性を持たせることが求められている。この点について日本の課題も同様であるものの、EU の場合、マイルストーン決め、具体的な実施事項が決まっていることと、再生可能エネルギー 100%を目指しているため、再生可能エネルギー導入に適したグリッドシステムの構築も視野に入れていることが異なっていた。

2 つ目は、オペレーションとメンテナンスについて挙げられている。オペレーションとメンテナンスを気象条件などのビッグデータと人工知能により最適化することに加え、人と物の配置についても最適化を行うことを課題としている。日本の場合、この点については言及しておらず、既に風力事業の導入と運用がある程度安定化した EU において更にパフォーマンスを上げるにはどうすれば良いか課題抽出した結果であると思われる。

3 つ目は、次世代技術開発である。EU ではタービンの高効率大型化と標準化、高リサイクル性がトレンドであり、これらの研究開発と標準化が進められている。一方、日本の場合は、高効率大型

化と標準化の動きは同じであるが、低風速と台風への両面対応が可能な技術の開発が必要であり、技術開発の難易度や方向性が異なっていることが分かる。

4 つ目は、洋上風力普及に関する課題である。洋上風力普及のためには、設置、操業やメンテナンスの際必要となる港湾の整備と大型風車を輸送、設置するための作業船の開発、ケーブルの整備、共通技術の標準化などを挙げている。これに関して日本も同様の課題を挙げており、EU と同様に、日本も日本風力発電協会のような業界団体を中心に課題の解決を進めていく必要がある。

5 つ目は、浮体式洋上風力に関する課題である。港湾や作業船の開発といったインフラストラクチャの整備が必要である他、風力資源の調査や浮体式に適した技術の開発も必要であり、EU においても浮体式が一筋縄ではないことが伺える。浮体式に関しては、日本では現時点で課題として取り上げられていない。しかし、NEDO の中で浮体式に関する F/S や実証事業なども進められており、日本の方が近海に深い海がある環境条件も整っていることから、浮体式洋上風力発電の普及可能性は十分にあると考えられる。

6 つ目は、スキルと人的資源についてである。今後の風力発電普及のために、職業訓練等の資格プログラムの導入や他部門の人材の活用の他、人材確保と育成、学術分野の育成と参画を課題としている。日本の場合、まだ風力発電事業が始まったばかりということもあり、事業環境整備に関連する提言はあるものの、人材育成の部分まで言及されていない。

その他、日本では漁業協調の点について課題の中で言及されていたが、EU の課題の中では特に記載がなかった。EU の場合、特に漁業補償に関して法的根拠はないが、一般的に 3 年分の商業保証が受け入れられている。この点が日本で特に取り上げられている理由は日本が漁業大国であるが故である可能性がある。

#### 4.4. 洋上風力発電の課題解決に向けたリサイクル材料活用の可能性

4.2.2において記載したとおり、日本における洋上風力発電導入拡大に際しての主要な課題として、「系統制約の解消」「洋上風力発電の導入促進」「風力発電のコスト低減に向けた技術開発」「風力発電事業の安定運営・導入拡大に向けた事業環境整備」がある。

これらは、いずれもわが国における洋上風力発電の着実な導入のため、すみやかな克服や対応が急務な要素である一方で、石炭灰をはじめとするリサイクル材料活用には「追い風」となる可能性がある。

まず、系統制約解消には、海底ケーブルの設置や増強が不可欠である。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。

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。また、一般海域占用に関しては、この提言後に法整備がすすめられ、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た。これらの区域では今後、協議会を中心とした検討や事業者選定が進められていく。事業者選定時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る。

くわえて、地産地消かつ産業副産物の活用はコスト削減に貢献が見込まれるうえ、水深の大きい沖合への展開や、さらに離岸距離が大きい海域への設置が基本となる浮体式洋上風力発電への移行は、軽さによって運搬コストが軽減できる石炭灰の活用可能性を高める期待もある。

実際に、4.3.3(3)の風力発電事業者等からのヒアリングにもあるとおり、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。

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。促進海域の決定などで具体化が進む現状への積極的な対応・働きかけと並行して、タワー等への適用・浮体式へのシフトを見据えた関係者との意見交換など、将来を展望した先行的な取り組みをすすめていくことが求められる。