

拡大を続ける欧州の洋上風力発電と日本の課題



長崎大学 海洋未来イノベーション機構
コーディネーター 織田 洋一

1977年 4月 三井物産入社
1984年 9月～ 英国三井物産
1993年 4月～ 三井物産ネクスト（代表取締役社長等）
2001年10月～ 三井物産金属原料（リサイクル事業本部長等）
2008年 4月～ 三井物産戦略研究所
（洋上風力発電、海流・潮流発電、海底資源開発等）
2017年10月～ 長崎大学 海洋未来イノベーション機構

はじめに

良いご縁に恵まれ、私は2017年10月に長崎大学で海洋未来イノベーション機構のコーディネーターを拝命しました。私は三井物産に約40年間勤務しましたが、そのうち2017年9月末までの約10年間は三井物産戦略研究所で洋上風力発電や潮流発電、海流発電などの海洋再生可能エネルギーや海底鉱物資源開発などの分野を担当しました。そこで、今回は欧州で巨大な産業に成長している洋上風力発電を取り上げ、欧州における発展の経緯や手法を分析しながら、日本で洋上風力発電を新たな産業として発展させるための方策や課題について考えたいと思います。

世界の風力発電の状況

世界的に見ると、風力発電は長期間に亘り発展を続け、今後も拡大が見込まれる成長産

業です。世界全体では、2016年一年間で54GW（5,400万キロワット）以上の風力発電装置（風車）が建設され、年間新設規模は前年を12.6%上回りました。この結果、世界全体の風力発電能力は2016年末に486GW（4億8,600万キロワット）に達しました。発電能力の単位であるGW（ギガワット）は、kW（キロワット）に換算すると100万キロワットに相当します¹。大型原子力発電装置1基の出力が100万キロワットと言われていいますので、世界全体では大型原発486基に相当する風力発電装置が設置されている計算になります。世界全体の風力発電能力はこの先も更に増え続け、2021年末には800GW（8億キロワット）を超すと予想されていますので、5年間で1.6倍に拡大することになります。

世界では90か国が風力発電を導入していますが、そのうち10GW（1,000万キロワット）以上の発電能力を保有している国は9か国、1GW（100万キロワット）以上の発電能力を

保有している国は29か国になりました。また年間の総電力需要量に対する風力発電による電力供給量の割合を国別に見ると、デンマークが40%と筆頭で、次にウルグアイ、ポルトガル、アイルランドの3か国が20%を大きく超えています。経済大国と言われるドイツでも16%に達しています。また大国である米国と中国は、各々5.5%と4%ですが、風力発電能力では、中国が世界1位、米国が世界2位です。

世界全体では、2010年に電力総需要量の約2.3%を風力発電が供給しましたが、2020年にはその2倍以上に拡大すると予想されています。

欧州における洋上風力発電の状況

欧州では、近年、新たに洋上風力発電が台頭し、四方を海洋に囲まれている英国を筆頭に急拡大しています。英国、ドイツ、デンマーク、オランダ、ベルギーなどの各国政府は、大規模展開できる洋上風力発電を新たな振興産業として位置付け、2000年頃から産業促進政策を推進した結果、欧州の洋上には商業プロジェクトとして大規模な風力発電所が次々に建設され、2017年半ばには発電能力（累計設備容量）が約14GW（1,400万キロワット）に拡大しました。欧州の洋上には大型原発14基分の発電能力に匹敵する洋上風車が立ち並んでいると言えます。

欧州では、洋上風力の発電コストが順調に低減しており、今後も更に低減を続ける見通

しです。特に2017年はドイツと英国で、従来の予想を超えた安価な売電価格による洋上風力発電事業が落札され大きな話題を呼びました。ドイツでは2001年にフィードインタリフ（FIT）（固定価格買取制度）と呼ばれる優遇買取制度が導入されましたが、2014年に再生可能エネルギー法²（EEG）が改正され、2017年の同法再改正によりオークション入札制度（Bidding Scheme）が導入されました。これにより2017年4月に実施された入札で落札された洋上風力発電所4事業案件のうち、3事業の売電価格条件が補助金なし³（Subsidiary Free）でした。英国でも2002年からROC⁴と呼ばれる再生可能エネルギー義務制度により優遇買取制度が導入されましたが、電力市場改革（EMR）によりCfDと呼ばれる制度に変更され⁵、2017年9月に洋上風力発電事業のオークション入札が実施されましたが、落札事業案件の最安値売電価格は、MWh（メガワット時）あたり57.5英ポンドで、日本円（1ポンド150円換算）ではkWh（キロワット時）あたり8.6円に相当する売電価格条件でした。

これらは洋上風力発電事業全体のなかで最も売電価格の低い事例ですが、欧州風力発電協会（Wind Europe）は、欧州全体の平均発電コストが、2030年に陸上までの系統接続費用込で平均65ユーロ/MWh（¥8.5/kWh（@¥130/Euro）以下に低減されると予想しています。また、欧州には総電力需要の約25%を供給できる最適海域が存在し、最適海域では平均54ユーロ/MWh（¥7.0/kWh

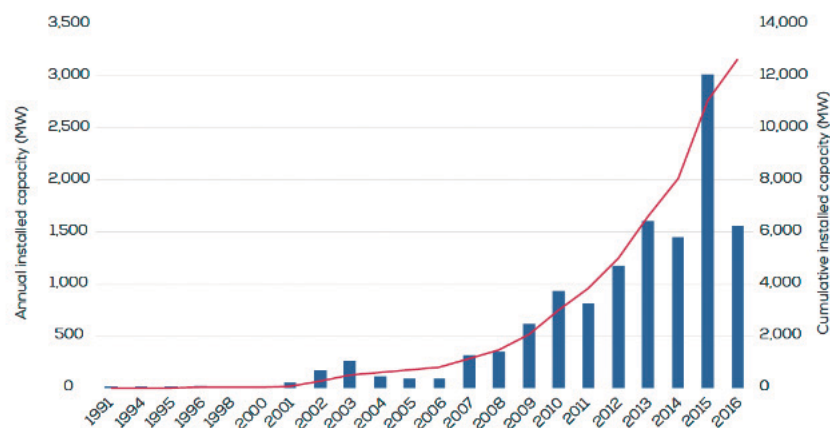
(@¥130/Euro) で発電が可能であると分析しています。

欧州の洋上風力発電コストは既に原子力発電コストを下回った(ともに解体撤去費用込)と言われてはいますが、更なるコストダウンを実現しながら、補助金不要の一般電源としての地位を獲得する可能性が高いと言えます。

洋上風力発電は再生可能エネルギーでありながら、補助金なしでも一般電源と競合できる電源としての競争力をつけてきたということになります。

欧州風力発電協会 (Wind Europe) は、欧州の洋上風力発電能力が2030年までに64GWに拡大するベースシナリオと86GWに拡大す

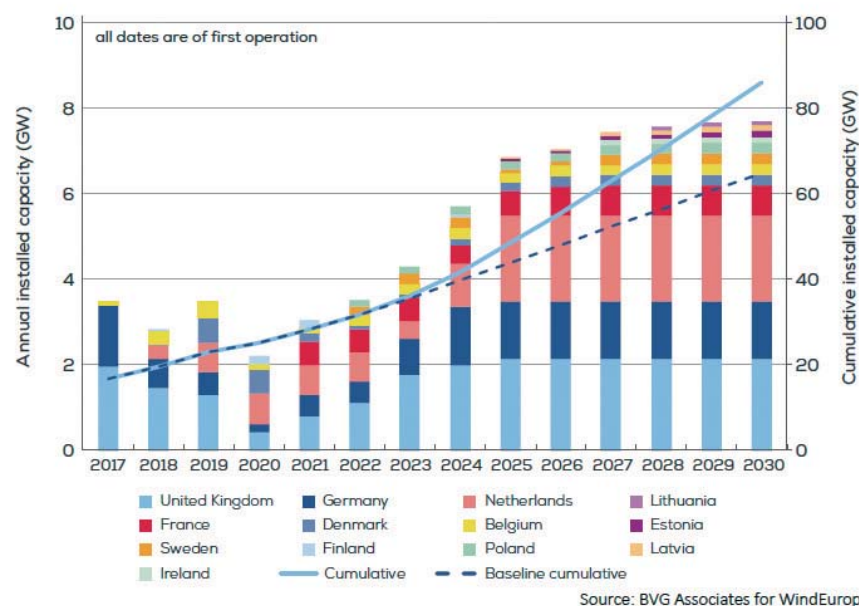
図1 欧州のこれまでの洋上風力発電能力の推移実績 (1991-2016)



(赤線：累計能力、青棒：年間新設能力) (Source: Wind Europe)

図2 欧州のこれからの洋上風力発電能力の推移予想 (2017-2030)

Installed capacity in the upside scenario to the end of 2030 for the EU member states in all sea basins



Source: BVG Associates for WindEurope

累計設備容量：Base Line Scenarioは点線 (64GW in 2030)

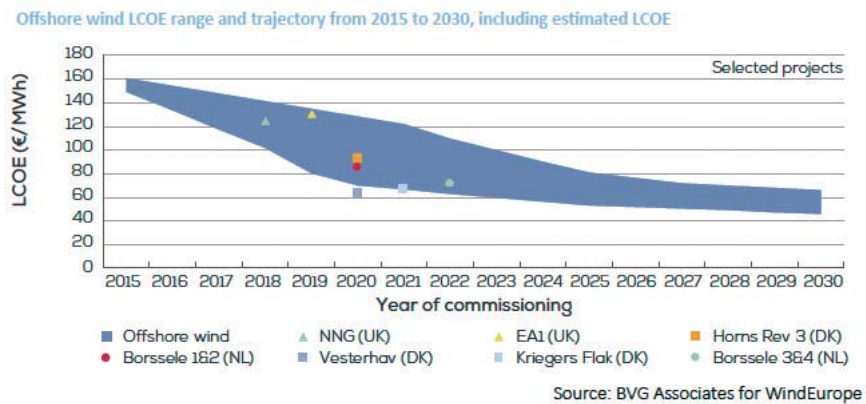
Upside Scenarioは実線 (86GW in 2030)

年間新設容量 (国別)：図の棒線はUpside Scenario

(Base Line Scenarioの前提は2024年以降新設4GW/年)

(Source: BVG Associates for Wind Europe)

図3 欧州洋上風力発電の発電コスト（LCOE）低減予測（2015-2030）



(Source: BVG Associates for Wind Europe)



英国 Sheringham Shoal洋上風力ファーム（317MW（31万7千キロワット））
（筆者撮影）

るアップサイドシナリオを2017年に発表しました。欧州では2030年に洋上風力発電が欧州電力需要の7%~11%を賄う見通しです。

欧州の洋上風力発電能力は、過去10年間で15倍以上拡大し、2016年末に累計12.6GWに増加し、年間投資額は180億ユーロ（約2.3兆円）に達しましたが、市場規模は2030年までにその5倍以上に拡大すると予測されています。

洋上風力発電の産業化と市場拡大

欧州では洋上風力発電市場が拡大し、関連産業も発達し、発電コストが低減しています。それなら、四方を海で囲まれた日本でも大い

に洋上風力発電を導入すれば良いと思いますが、欧州でも初めからうまく行っていた訳ではありません。日本では国が主導して洋上風力発電の実証事業が実施されましたが、国による洋上風力発電の推進政策や民間企業による商業発電事業はまだありません。その意味では2000年以前の欧州の状況に似ていますので、その頃からどのような道程を辿って欧州の洋上風力発電が今日に至る発展を遂げたかということ进行分析する必要があります。

欧州で最大の洋上風力発電能力を有する英国は、ご承知の通り日本と同様に四方を海で囲まれた島国です。英国政府は2000年から

3段階に分けて周辺海域を計画的に洋上風力発電事業用海面としてゾーニングし、順次洋上風力発電事業者を公募しました。UK Offshore Wind Roundと呼ばれていますが、合計40GW（4,000万キロワット）と大型原発40基分の発電能力に匹敵する大規模な産業化計画です。ラウンド1は沿岸付近の海面が対象で合計計画発電能力が1.5GW、ラウンド2は領海内外の海面が対象で合計計画発電能力が7.3GW、ラウンド3は領海外の排他的経済水域（EEZ）の海面が対象で合計計画発電能力が32GW、と徐々に沖合展開を図るとともに、ラウンドごとに海面面積と発電能力が拡大しています。英国政府はこれらの海面を洋上風力発電事業用海面としてゾーニングする

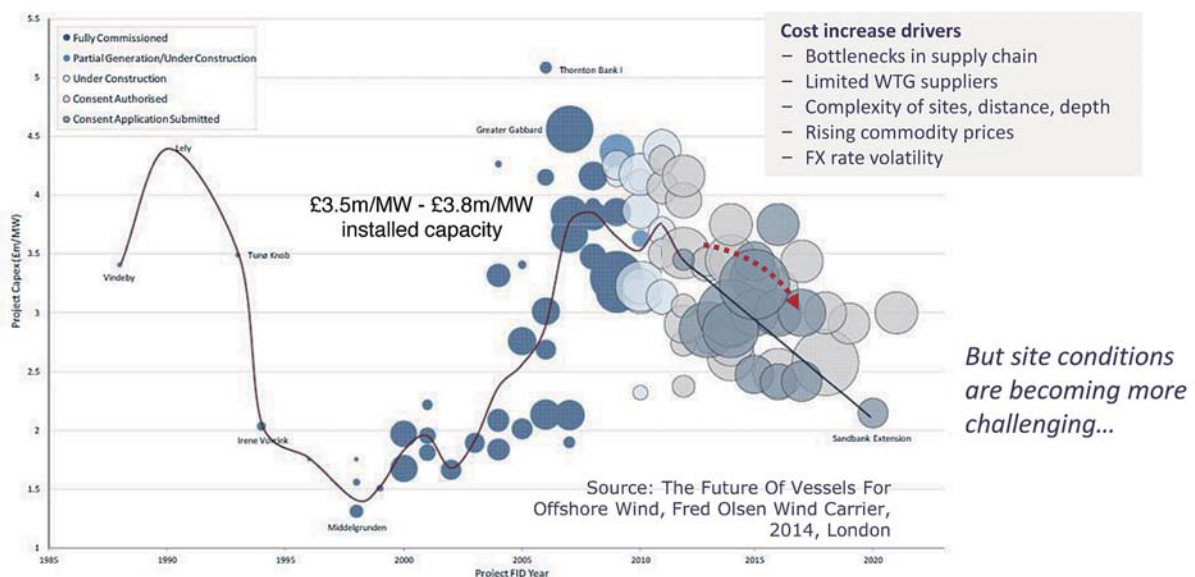
ために洋上風況調査、海底地形調査、漁業者、海運事業者、海軍等の海面利用者との協議を実施しています。洋上風力発電事業者に対する長期海面使用契約のための入札時期は、ラウンド1が2001年3月、ラウンド2が2003年12月、ラウンド3が2010年1月でした。英国で現在建設中の洋上風力発電所は主にラウンド2の事業ですから、海面利用リース契約から建設まで10年以上かかる長期事業計画を政府の主導で大規模に推進しています。英国以外の各国も政府が政策主導型で洋上風力発電の市場創出を図ってきました。

尚、現在英国で建設中のラウンド2の事業は沿岸から50km程度の沖合に洋上風力発電所を建設している事業もあり、沿岸基線から12

図4 欧州における洋上風力発電のコスト推移（発電出力あたりCAPEX）

Cost trends in Europe

Costs in Europe were increasing, but are now falling fast



(Source: The Carbon Trust)

海里（約22.2km）までの領海の外に位置しているため、建設作業員などが洋上建設現場に行く時にはにはパスポートを携帯する必要があります。

この様に欧州では政策主導で2000年頃から洋上発電事業が開始されましたが、初期には発電能力あたりの建設コストや発電コストは上昇を続けました。洋上風力用のサプライチェーンの整備も不十分で、特殊建設船も不足していました。関連部材も大量生産すれば生産コストが下がりますが、民間企業は市場規模が小さい間は簡単に設備投資等に踏み切れません。その様な苦しい時期にも各国政府はフィードインタリフの様な優遇買取制度に加え、洋上風力発電事業に対し、優先接続規定や優先給電規定などの優遇支援策を導入し、洋上風車が発電した電力が最大限売れるような促進策を導入して、洋上発電事業者を支え続けました。仮にもしこの様な支援策がなければ洋上風力発電の事業リスクが増大し、今日の様な発展は実現しなかったかもしれません。政府主導の長期大規模計画と初期市場に対する一貫した支援政策がその後の市場拡大と発電コストの低減に導く鍵だったと思います。漸く2008年頃からコストが低減傾向に転じていますので、累計設備能力が1GW以上に拡大するまで支え続けた結果、サプライチェーンが整備され、市場規模の拡大により競争原理が働く市場が実現できたので、コスト低減のメリットを享受できた訳です。

コスト低減のポイント

さて、2008年頃からコスト低減に転じた欧州では、その後順調に発電コストの低減が進んでいることは既に述べた通りですが、そのポイントについて考えてみたいと思います。

洋上風車の大型化、洋上発電所（ウインドファーム）の大規模化、洋上建設技術の進歩、市場拡大によるサプライチェーンの整備等による発電出力あたり資本費用（CAPEX）の低減、洋上風車の大型化と性能向上、洋上風況観測技術の向上とサイト選定、風車配置の最適化による発電量の最大化、故障率の低減やサービス船の高速化によるメンテナンスコストの低減など様々なポイントがありますが、そのなかでもコストダウンに大きく寄与しているのが風車の大型化です。洋上風車のサイズは、過去10数年間で、ローター直径が82m～93mの出力2.3MW機、約120mの3.6MW機、154mの6MW機、164mの8MW機と、どんどん大型化されています。風車1本あたりの発電出力は基本的にはローター直径の2乗に比例しますので大きいことは、発電コストの低減に効率的で、良いことなのです。最近、欧州の風車メーカーは、発電出力13MWの風車開発についても語る様になっています。同じ風況であっても風車の大型化により発電コストが下がることは日本でも留意する必要があると思います。

一般的に、沖合ほど風速は速く風況も安定します。また、高さが高いほど風速が速くなります。風車の発電量は基本的には風速の3

図5 洋上風車の大型化の歴史



(Source: DONG Energy)

乗に比例しますので、沖合展開と風車の大型化は非常に重要です。水深が深くでも沖合に出せる浮体式風車では年間設備利用率50%の事例もありましたが、着床式風車では従来は30%程度のプロジェクトが多かった様です。ところが、最近は着床式でも年間設備稼働率が50%近いプロジェクトが欧州で出現しています。

欧州では浮体式風車による発電コストが今後急速に低減され、2025年頃になると現在主流である着床式風車の発電コストと同等の水準にまで低減され、その後逆転するという予測が出されていますが、それには、浮体式市場の拡大に加え、浮体式風車の大型化と発電事業の大規模化、浮体式設置工法開発等が重要な要素になると考えられます。

総合海洋政策本部参与会議の提言

総合海洋政策本部（本部長：首相）に設置された参与会議の平成27年度報告書には、洋上風力発電に関する提言が次の様に記載されています。

我が国で大規模な洋上風力発電産業を実現するためには、欧州各国と同様に政府が新たな洋上風力発電産業の推進意欲を示し、規模感のある産業ロードマップを提示する必要がある。大型ウインドファームは、例えば現在の5MW風車を利用した投資規模約3,000億円の出力500MW（50万キロワット）のウインドファームの場合、約15km四方の海域を風況の安定した沖合に建設するため、一般海域の利用と事業用の海域ゾーニングが必要である。更に2020年頃に実用化が見込まれる

10MW風車を利用すれば、合計15km×600kmの海域をゾーニングすることにより合計20GW（2,000万キロワット）の洋上風力発電事業を建設でき、我が国の電力需要の約5%を洋上風力発電で供給できるとともに、電力コストの引き下げが期待できる。

欧州ではコストダウンが更に進展し、着床式と浮体式が同等のコストまで引き下げられる見通しであるが、我が国も市場の拡大、関連インフラの整備、技術革新等により発電コストの低減を積極的に推進するべきである。

電力広域的運営推進機関等では、系統強化が検討されており、その実施と合わせ洋上風力発電の大規模産業化が期待される。

新たな産業である洋上風力発電の創出と振興を図るうえで重要な視点は、プロジェクトの事業採算性の確保とリスク低減、保険・投融資環境の整備、関連インフラと海洋建設産業の整備、発電コスト低減の見通しなどである。

発電コストの低減にはコストダウンが重要であり、コストダウンを左右する重要な鍵は、市場拡大による競争市場の実現、一般海域利用による大規模プロジェクトの実現、大型風車の採用、関連インフラと海洋建設産業の整備、新型風車や設置工法などに関する技術革新などである。このため、洋上風力発電については、「戦略的導入プラン」を検討するべきである。「戦略的導入プラン」の検討については、洋上風力発電分野の専門家に加え、洋上風力発電プロジェクト推進のキープレイヤーである開発事業者、保険会社、銀行等に参画願ひ、国や関係機関と協議をすることが

望ましい。

欧州の様に本格的な洋上風力発電事業を推進するためには、プロジェクトファイナンスを組成する必要がありますが、欧米の主要国とは異なり、日本には港湾区域以外の一般海域を洋上風力発電の様な事業に利用するための法律やリーガルフレームワークが整備されていないため、発電事業者が負うべき法的義務等が定められず、所謂デューディリジェンス（資産の適正評価）が実施できません。このため、国には一般海域を長期間事業利用し、関係当事者間の合意を形成するための法律等の整備が求められています。また洋上風力発電事業者、保険、銀行等と国が協議して大きな市場を創出するための方策等を協議することが重要です。

長崎から成功事例を作る

地球規模で見れば、現在約73億人の世界人口は、2050年に約94~100億人に増えると予想されています（国連人口推計中位予測）。このため、食料供給力の増強が世界的な重要課題となっていますが、このなかで養殖事業が大きく注目されています。特に、同じ量のタンパク質を生産するために必要な餌の量の指標であるFeed Conversion Ratioは、牛を10とすると豚は2なのですが、エビは1.5、鮭は1.2と非常に効率が良いのです。実際に、世界の養殖の生産量は、2004年の約4億トンから2016年には約8億トンと倍増し、今後も

更に大きく発展すると予想されています。

長崎はもともと水産業が盛んなエリアです。今後、養殖業を大きく伸ばす素地が整っています。養殖は新たな技術やイノベーションにより、大型の沖合養殖も今後大きく発展させられる可能性があります。

また、長崎は浮体式洋上風力発電の先進エリアです。洋上風力も沖合に出るほど、風況が安定し採算性が向上します。日本では、従来は、洋上風力発電の沖合展開は漁業の障害になるため難しいと考えられてきましたが、養殖事業と洋上風力発電が同じ海面で共に成立する成功事例を創出できれば、相互利用によるコストダウンも期待できます。このため漁業と発電事業がともに発展し、地域産業に相乗効果をもたらす新たな産業を創出することが可能で、日本の養殖事業と洋上風力発電事業の発展に新たな扉を開くことができるでしょう。

このような構想力を磨き、新たな事業を推進するための先導的な研究を行うことも長崎大学海洋未来イノベーション機構に期待される役割ではないかと考えているところです。長崎に世界の人々が集まり新たな取り組みが推進できる場になるよう、微力ながら努力したいと考えていますので、今後とも何卒宜しくお願い申し上げます。

1 1GW (ギガワット) =1,000MW (メガワット) =1,000,000kW (キロワット)

2 再生可能エネルギー法 (EEG : Gesetz fuer den Vorrang der Emeuerbaren Energien)

3 ドイツで2017年4月に実施されたオークションでは、着床式洋上風力プロジェクト落札案件4件のうち1件 (Gode Wind 3 (110MW) by DONG Energy) は Euro60/MWh (¥7.8/kWh) での入札であったが、残り3件が売電価格 = 100% 市場連動価格 = 「補助金ゼロ」で入札されたため注目を集める結果となった。補助金ゼロで入札されたプロジェクト3件は、OWP West (240MW) and Borkum Riffgrund West 2 (240MW) by DONG Energy、He Dreiht (900MW) by EnBWであった。尚、ドイツの売電価格は洋上変電所における受電価格、英国の売電価格は、洋上変電所から陸上までの送電コストを含む陸上変電所での受電価格である。

4 ROC : 再生可能エネルギー義務証明書 (Renewable Obligation Certificate)

Renewable ObligationはRE電源 (再生可能エネルギー電源) の供給を増加させるために英国が2002年から地域別に順次導入した制度。ROCは発電事業者がRE電源により発電した発電量 (MWh) ごとに政府機関 (Ofgem : Office of Gas and Electricity Markets, ガス電力市場規制庁) が発行するグリーン証書。発電事業者は、義務量以上のRE発電を実施した場合にはROCを売却して収益が得られるが、RE発電義務量を下回った場合には未達分のペナルティーを支払う義務がある。ROCは電源種別毎にその発行単位が異なり、発電開始から20年間に亘って支給される。また、ROCは電力を市場で販売する売電収益とは別に取り扱われる。英国のEMR (Electricity Market Reform: 電力市場改革) によりROCは電源別に順次CfDに置き換えられているが、Scotlandの浮体式洋上風力に関してはGlance Periodにより延長されており、2018年9月までに運転開始するプロジェクトまで3.5ROCが適用される。

5 CfD: Contract for Differenceは、電力市場改革プログラム制度のひとつで差額決済契約付固定価格制度 (FIT with Contracts for Difference) である。即ち、CO₂排出量の低い電源に対して予め行使価格 (Strike Price) を設定し、その時々の電力市場の平均卸売電力価格により算出される参照価格 (Reference Price) との差額が、運転開始から15年間、発電事業者に対して投資インセンティブとして国から支払われる仕組みである。但し、従来のROC (再生可能エネルギー義務証明書) の適用期間が運転開始後20年であったのに対し、CfDの適用期間は15年である。