世界市場を牽引する風力エネルギー

風力は、再生可能エネルギーへの転換をどのように推し進めるのか

この白書の内容

風力エネルギーが進める電化

風力エネルギーの経済効果

洋上風力発電の入札の新時代

風力エネルギー技術のレベルアップ

COLOPHON

世界市場を牽引する風力エネルギー

風力は再生可能エネルギーへの転換のどのように推し進めるのか

Version 1.0
英語版2021年11月
日本語版2022年4月

表紙写真

写真提供: Vattenfall

編集責任者

State of Green
Maja Østergaard
moe@stateofgreen.com

State of Green
Lise Holmegaard Larsen
lhl@stateofgreen.com

技術編集者

デンマーク産業連盟
Hans Peter Slente
hps@di.dk

デンマークエネルギー庁
Nick Christopher Damgaard Jensen
ncdj@ens.dk

デンマークエネルギー協会
Simon Riis Verland
srv@danskenergi.dk

デンマーク風力発電協会 (Wind Denmark)
Peter Alexandersen
pal@winddenmark.dk

日本語版監修

環境エネルギー政策研究所
デンマーク王国大使館

この白書のダウンロードについて

この白書とその他の関連出版物は、
www.stateofgreen.com/jp/出版物とビデオ（日本語）
www.stateofgreen.com/publications (英語)からダウンロードできます。

詳しくは

その他の関連出版物に関する情報をご希望の方は、下記までお問い合わせください。
tyoamb@um.dk　（日本語）
ステート・オブ・グリーン info@stateofgreen.com (英語)

© Copyright State of Green 2022

エグゼクティブ・サマリー

デンマークは世界で初めて、2050年までに化石燃料から完全に脱却することを決定した国です。この目標を達成するための一つの要素として、風力による再生可能エネルギーの割合を拡大し、再生可能エネルギーの変動性を管理できるインテリジェントなエネルギー・システムの開発を推進することが挙げられます。

デンマークは30年前に商用の洋上風力発電を設置した最初の国であり、数十年にわたり風力産業の先駆者として取り組んできています。2019年、デンマークの風車はデンマークの電力消費量の47.2%相当をカバーしました。これは新記録であり、前年2018年から7%以上増加したことになります。

風力エネルギーを革新するグローバルな拠点

デンマークは風力エネルギーの技術革新と開発における世界的なハブであり、デンマークの風力産業は33,000人以上を雇用しています。高度な技術を持つ労働力、試作品をテストするための最新鋭の施設、企業・研究機関・政府の研究プログラムの包括的なネットワークが、世界でも他に類を見ない革新的な研究開発環境を作り上げているのです。デンマークでは、ナセルやブレードから、ほぼ市場投入可能なフルスケールの風車まで、風車のすべての部品をテストすることができます。このため、世界中の企業が研究開発業務の中心をデンマークに置いているのです。

安定的かつ費用対効果の高い供給の確保

現在、デンマークでは、約4,800基、合計6.9GWの風車が設置されており、その多くは陸上に設置されています。6.2GWは、デンマーク全体の発電設備容量の3分の1以上に相当します。大規模な風力エネルギーの統合を可能にしているのは、変動する風力エネルギー資源を扱うことができる能力を持つ十分に整備された送電インフラです。デンマークの電力系統は近隣諸国と連系されており、ピーク時の電力エネルギーの輸出入を可能にしています。

グリーン転換に向けた枠組みの構築

再生可能エネルギーへの転換コストは低下しており、デンマークの洋上風力発電所の最新の入札では、最も低い均等化発電コスト（LCOE:Levelized Cost of Electricity）になっています。これは、洋上風力発電所のライフサイクルに必要なすべての費用を考慮したときに、世界でも最も安い価格で電力を供給できる洋上風力発電であることを意味します。デンマークの入札公募モデルは、事前の事業者適格性審査と潜在的な入札者および投資家との事前技術対話の両方がプロセスに組み込まれており、低コストによる入札成立の要因となっています。価格が低下しようと、プロジェクトの資金調達は依然として重要なテーマであり、デンマークは、一般市民による風力協同組合、大規模な官民共同の資金調達モデルの両方についての先駆者であり、例としてブレンドファイナンスが挙げられます。

この白書について

この白書では、デンマークの風力エネルギーの成功体験を構成するすべての要素をご紹介しています。出発点から、いまでは小規模とみなされるような風車まで、再生可能エネルギー資源としての風力エネルギーのレベルを押し上げたプロジェクトや技術、そして野心的な取組みまで紹介しています。ご参考になれば幸いです。

風力エネルギーを共有する

DAN JØRGENSEN　デンマーク気候・エネルギー・公益事業大臣

風力は、化石燃料への依存を減らし、エネルギー安全保障を確保するために、今後さらに開発されるべき豊富な再生可能エネルギー資源です。2020年までに、EUで消費される電力量の15%以上を風力エネルギーが占めるようになりました。風力エネルギーの先進国であるデンマークでは、ほぼ50パーセントに達しています。2030年までに温室効果ガスを70%削減するというデンマークの目標達成に、風力エネルギーは重要な役割を担っているのです。

現在、風力エネルギーはすでにヨーロッパのエネルギー供給において信頼性と競争力のある柱となっています。そして世界では、アメリカ、中国、インド、ブラジルなどの主要国が風力エネルギーへの最大の投資国の一つとなっています。風力発電は、ほぼすべての国で成長していると言っても過言ではありません。

ヨーロッパでは、今後さらに風力エネルギーを加速させるための目標や計画が立てられています。洋上風力発電を、2030年までに設備容量を5倍にし、2050年までに25倍の300GWにする計画があります。

デンマークでは、西海岸から80kmの沖合にエネルギー拠点となる人工島を建設する計画があり、この方向で大胆な取り組みが行われています。

このエネルギー・ハブは島を囲む数百基の風車からグリーン電力を集め、北海周辺の国々の消費者に直接送電する洋上発電所として機能します。このエネルギー・ハブは、これまでにない大量のグリーン電力を扱うことができ、欧州におけるグリーン転換の先進的なプロジェクトです。このプロジェクトが完工すれば、欧州の1,000万世帯の電力消費を賄うことができます。

風力エネルギーのパイオニアでありリーダーであるデンマークは、パートナーと共有できるものがたくさんあります。風力エネルギーの計画、建設、電力系統への接続において、最小限のコストで最大限の効率を確保するための経験があります。また、大量の風力エネルギーをエネルギー・システムに効率的に統合する方法も分かっており、それによってセクターカップリングを通した経済全体の電力消費量は増加します。さらに、デンマークには風力エネルギーの分野で世界的に卓越した技術者や事業者がおり、その経験や取り組みを世界中のパートナーと共有することを望んでいます。

私たちは、国際的なパートナーという形で、皆さまとご一緒する準備ができています。ともに風力エネルギーへの取り組みを続けることを楽しみにしています。

Dan Jørgensen
デンマークの気候・エネルギー・公益事業担当大臣

目次

1.	デンマーク ― 風力エネルギーの先駆者	6
2.	気候法(The Climate Act)が示すこと	9
3.	風力エネルギーによる電化	10
4.	デンマーク海域	15
5.	強力な国際協力とパートナーシップ	16
6.	洋上風力発電の入札の新時代	20
7.	風力エネルギーの経済効果	25
8.	風車についての基礎知識	26
9.	NIMBYからPIMBYへ	30
10.	風車の騒音による影響	33
11.	風力エネルギー技術のレベル向上	34
12.	未来の風車を試験する	36
13.	コストを下げる	42

第1章

デンマーク - 風力エネルギーの先駆者

農業用風車から特殊な目的の風車まで、デンマークの風力発電産業は技術開発の最前線にいます。陸上風力は既に最も安価な電力供給源となり、社会の電化が次の大きなステップになります。

風車は当初、穀物を挽いたり、水を汲んだりする農業用として使われていました。しかし、1891年、デンマークの物理学者ポール・ラ・クールは、風力エネルギーを電気エネルギー源として利用する実験を行いました。ポール・ラ・クールは、風力エネルギーの実験に成功し、国の助成を得て、勤務先の学校に直流で電力を供給する風車をつくりました。1894年には、風力エネルギーで得た電気を水素に変換して貯蔵する実験も行っています。

デンマークの技術者たちは、電力不足の中で電力供給を維持するために、第一次、第二次世界大戦中も風車技術の改良を続けました。第一次世界大戦の終わりには、デンマークの電力消費量の3%が風力エネルギーでまかなわれるようになりました。しかし、化石燃料の価格が安いため、従来の発電所にはかなわないという理由で、風車の技術開発はほとんど止まってしまいました。

取り戻された風力への関心

この認識を変えたのが、1973年から74年にかけての第一次オイルショックです。輸入エネルギーへの依存度が高かったため、この1970年代初頭の危機により、デンマークでも電気料金が上がりました。その結果、風力エネルギーや再生可能エネルギーが再登場しました。

1970年代後半に風力発電産業が立ち上がったのは、風力エネルギーに対する国民の大きな関心と政策的な取組みの結果です。1980年代初頭までに、デンマークでは約20社の風車メーカーが設立され、1990年代の統合の段階を経て、風力業界は国際的な資本や上場した大企業が中心となっていきました。

化石燃料を上回る性能

現在、デンマークの風力発電産業は33,000人以上を雇用し、2019年の売上高は190億ユーロ(2.5兆円)に達しています。より高い効率性とエネルギーコストの低減を常に追求する中で、風車のサイズは年々着実に大きくなっています。1990年代前半の風車の多くは225kW以下でしたが、最新機種では15MWにまで達しています。その結果、風力エネルギー技術のコストは年々大幅に低下しています。今や風車はコスト効率の高い発電技術となっています。実際、デンマークをはじめとする世界の多くの地域で、陸上風力発電は最も安価なエネルギー源となっており、どの化石燃料よりも優れています。

洋上での風力発電の活用は、陸上よりもコストがかかります。しかし、洋上に風車を設置することで、より豊富で安定した風力資源を活用でき、地域住民による懸念も少なくなるというメリットがあります。デンマークは、洋上風力発電のパイオニアとして、1991年には世界初の洋上風力発電所を建設しました。現在、デンマークのバリューチェーンは、洋上・陸上風力ともに、風力発電プロジェクトのあらゆるフェーズを対象とした幅広い技術とサービスを提供しています。

未来に向けて

風力エネルギーのコストが下がり続けるにつれ、エネルギー・システムの転換期における役割は大きくなっています。それに伴い、デンマークは電化に多額の投資をしています。直接電化の典型的な例は、電気自動車や電気ヒートポンプのように、従来の化石燃料車を電気自動車に置き換えることです。しかし、Power-to-X(パワー・トゥー・エックス)のような間接的な方法もあります。

この場合、燃料を電気に置き換える代わりに、電気を大型車用の水素や船舶用のアンモニアなどの液体燃料に変換します。

デンマーク社会の電化を支援するため、デンマーク議会はエネルギー合意を継続的に更新しています。2019年には、2030年までに国の温室効果ガス排出量を70%削減（1990年比）し、2050年までに気候ニュートラルに到達するという法的拘束力を持つ国家気候法を制定しています。

この目標を達成するためには、より多くの風力エネルギーが自然環境内および人工的に建設された洋上風力発電のハブに設置される必要があります。風力発電産業はすでに、自らのバリューチェーンの二酸化炭素排出量を削減するための戦略を打ち出し始めています。

さらに、99.99%の安定した電力供給を維持するためには、風力や他の再生可能エネルギーの変動性のエネルギーを貯蔵したり、近隣諸国との連系を強化するなど、デンマークはシステム統合の方法を改善し続けなければなりません。

写真提供：ステート・オブ・グリーン

デンマークは今後数年間で、2030年の温室効果ガス排出量削減目標を達成するため、大規模な電化に着手します。石油、石炭、ガスは、すべてのセクターで風力発電によるグリーン電力に取って代わらなければなりません。デンマーク議会の大多数は、グリーンな移行に向けた高いハードルを設定する気候変動法を支持しています。

写真提供：デンマーク議会/Christoffer Regild

第2章

気候法(The Climate Act)が示すこと

2020年気候法で、デンマーク議会の賛成多数で、2030年までに国の温室効果ガス排出量を70%削減することを決定しました。同法には法的拘束力があるということが、それを国際的なグリーンな「かがり火」たらしめています。

2019年に行われたデンマーク議会選挙は、地球温暖化が有権者の頭の中の最重要事項であることを示しました。この選挙では、デンマークが2050年に気候ニュートラルになるという究極の目標に近づくための数多くの政策的イニシアティブが提示され、「グリーン・ゲーム・チェンジャー」となりました。

選挙後、これらの取り組みは、広範な政策的合意と具体的な行動に移されました。2019年9月には、2030年までに温室効果ガス排出量を1990年比で70%削減するという包括的な目標を掲げた気候法が可決されました。この法律は、国会の94%が賛成票を投じ、法的拘束力を持つようになりました。

13 の気候変動パートナーシップ

目標達成のため、政府はデンマークのあらゆる産業界を代表する13の戦略的な「気候変動パートナーシップ」を結成しました。各パートナーシップは4ヶ月の間に、それぞれの産業がどのように排出量を削減できるかについて提言をまとめました。この提言は、デンマークの政治家が、産業界と密接に関わりながら、正しい対策を講じるための指針となっています。

この提言は、排出量削減のためにセクターを超えた政策的合意を形成する際に利用されます。中でも、拘束力のあるルールを最初に決めたのは、生産セクターとエネルギーセクターです。ここでは、2020年夏に大筋の合意がなされました。この合意で導入されたのはエネルギー島の設立、洋上風力発電の大幅な増強など、グリーンシフトを推進するためのさまざまな取り組みが含まれています。この合意により、排出量70%削減の目標達成に必要な約2,000万トンのうち、2030年までに340万トンの CO_2 排出量を削減する道が開かれました。

今後数年間で、デンマーク議会は、運輸セクターや熱セクターなど、デンマークの他のセクターに関する協定を追加する予定です。70%目標の達成においてはデンマーク社会の電化が鍵となるため、これらのセクターでの取り組みは不可欠です。同じ理由で、今後、すべての政策法案は CO_2 算定の対象となり、政策全体の排出削減への貢献度を判断することになります。

グリーンへの導き

世界的に見れば、デンマークのカーボンフットプリントは、世界の CO_2 排出量のわずか0.1%にすぎません。そこで、疑問が生じます。なぜデンマークは温室効果ガス削減のためにこれほどまでに野心的な目標を設定したのでしょうか?その答えは簡単です。デンマークは、経済成長から CO_2 排出量をデカップリングする方法を世界に示す上で重要な役割を担っているからです。

今後数年間、デンマークはグリーン転換を推し進め、グリーン・ビジネスは良いビジネスであることを世界に示すことになります。そうすることで、デンマークは、2015年のパリ協定で定められた気候変動目標の達成が本当に手の届くところにあることを示し続けることになります。

第3章

風力エネルギーによる電化

再生可能エネルギーによる直接電化は、様々な分野の脱炭素化のために中心的な役割を担っています。しかし、一部の産業プロセスや大型輸送機器は、グリーンな燃料や原料を必要とします。その解決策が、再生可能エネルギーから製造される水素や合成燃料です。

デンマークでは、今後数年のうちに輸送と熱セクターの両方で包括的な直接電化が進むと予想されています。直接電化とは、あるプロセスのエネルギー源を燃料から電気に変換することで実現されます。再生可能エネルギーを直接電化に利用することで、いくつかの社会的なメリットが生まれます。

例えば、化石燃料の場合、再生可能エネルギーで発電した電力に置き換えることで排出量はゼロになります。また、多くの場合、エネルギー効率も向上します。電気自動車のエネルギー効率は約80%ですが、自動車の内燃機関のエネルギー効率は約30%にすぎません。また、電気ヒートポンプは、従来のボイラーの3〜4倍の効率を誇ります。

間接的な電化

直接の電化は小型の自動車や暖房などに活用できますが、他の産業では、電気だけでは足りないためエネルギー密度の高い燃料が必要です。化学電池に蓄えられた電気は、長距離の大型輸送や一部の高温の工業プロセスで使用するにはエネルギー密度が不十分です。デンマークでは高温を必要とする建材の生産だけで年間約10TWhの電力を必要とします。デンマークの工業と大型輸送の分野全体では、50〜60TWhの電力を必要とすることになります。これは、15GWの洋上風力発電所からの出力に相当します。これに対するサステナブルな解決策が、間接の電化です。

エネルギー密度の高い新しい製品を作るための化学プロセスに電気を代用できたとき、間接的な電化が実現できます。例えば、電気分解では、再生可能エネルギーからの電力で水素と酸素に分解します。再生可能エネルギーから製造された水素は、輸送、産業、そして農業に利用することができます。また、再生可能エネルギーから製造された水素と再生可能エネルギーからの炭素を結合して、実質的に酸素しか副産物のない合成燃料(e-fuels)を製造することができます。

運輸セクターの電化

合成燃料は、タンク、パイプライン、エンジンなど、既存の液体燃料のインフラに簡単に導入することができます。また、石油やガスと同様に、海上輸送やパイプラインによる長距離輸送が可能です。このように、合成燃料(e-Fuels)はエネルギー貯蔵の役割も果たします。

デンマークでは、道路、海運、航空、エネルギーの各セクターの企業で構成される洋上風力発電のエネルギーを使って、再生可能な水素を大規模に製造することを計画しています。この水素は、まずは燃料電池自動車に使用される予定です。2030年に向けてプロジェクトが拡大すると、水素は炭素源(例えば持続可能なバイオマス)と結合し、船舶や航空用の合成燃料となります。世界的に見ると、運輸セクターは大きな削減効果を得ることができます。電化によってCO_2排出量を削減することができます。デンマークだけで、運輸セクターから620万トンの CO_2 排出量を削減することができます。

エネルギー貯蔵

風力発電や太陽光発電の最大の課題は、出力を調整できないことです。その解決策の一つが、電力システムに費用対効果の高いエネルギー貯蔵設備を導入することです。デンマークでは、いくつかの代替エネルギー貯蔵技術が開発されています。

高温蓄熱

デンマークのエネルギー企業であるAndel社（旧SEAS-NVE）は、デンマーク工科大学、オーフス大学地球科学、デンマーク・エネルギー協会、Energinet、ロックウール(Rockwool)社と共同で、高温蓄熱ソリューションを開発しました。これは、電気ファンヒーターからの空気で600度まで加熱した岩石にエネルギーを蓄えるものです。この熱は、後に従来の電気タービンを駆動するために取り出されます。このソリューションは、競争力のある価格でデンマーク全土に大規模に導入され、安価で環境に優しい方法で大量のエネルギーを蓄えるという課題に取り組むことが目的です。

寄稿者

デンマーク工科大学（DTU）、オーフス大学、デンマーク・エネルギー協会、Energinet、Rockwool社

所在地

DTU Risø Campus, Roskilde

写真提供：Mike Wichm

リチウムイオン電池の蓄電

ABB社は、デンマーク初の都市型エネルギー貯蔵システムを稼働させました。このリチウムイオン電池を用いた蓄電システム（BESS）は、地域の電力系統と統合されています。太陽光と風力発電が発電の大部分を占めるエネルギー・システムにおいて、蓄電システム・ソリューションは重要な位置を占めることになります。再生可能エネルギーの生産は断続的であるため、蓄電システムはエネルギー供給の安全性を確保するための重要な要素になります。

寄稿者

ABB, EnergyLab Nordhavn

所在地

Nordhavn、コペンハーゲン

写真提供：ABB

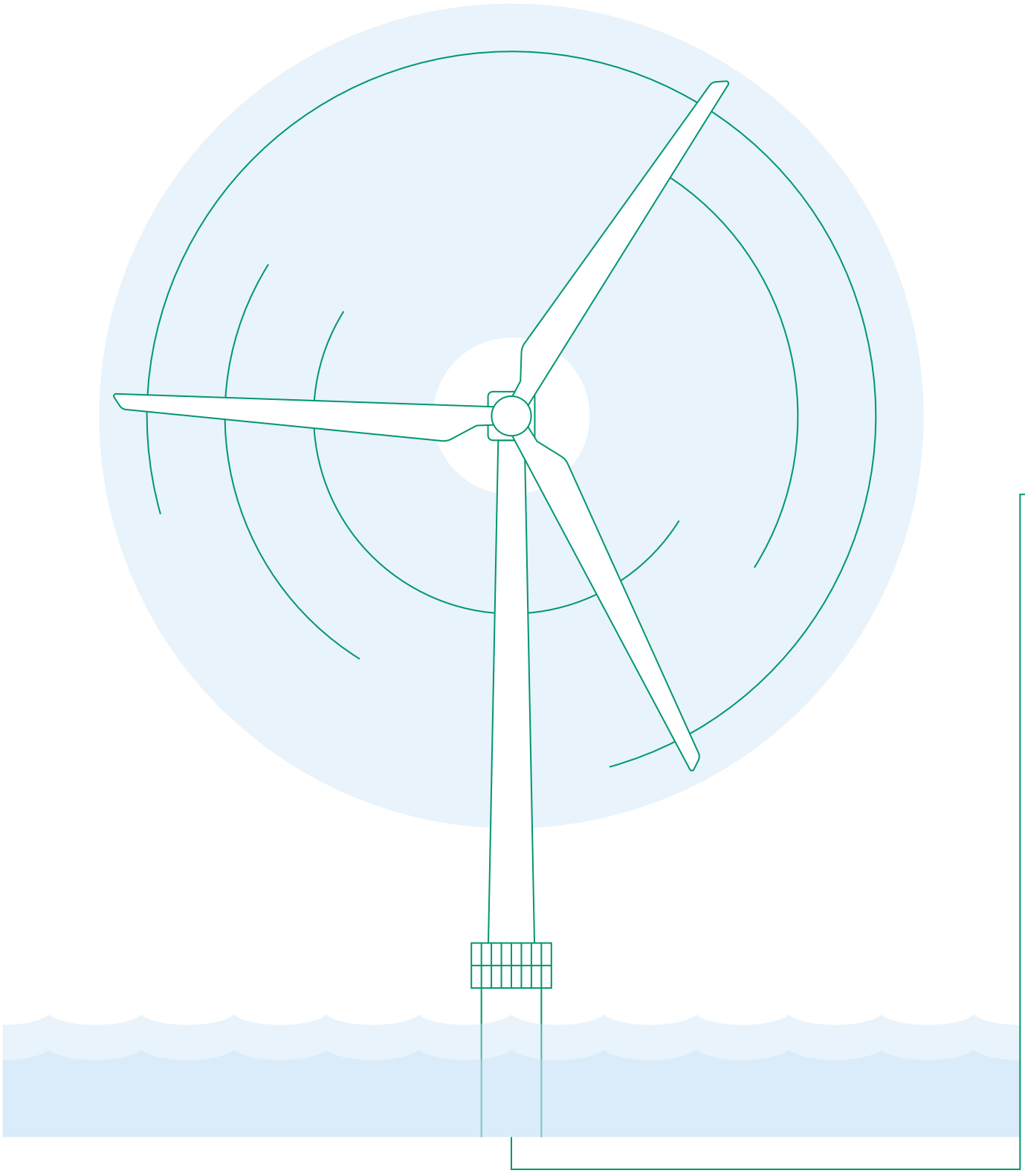


図1

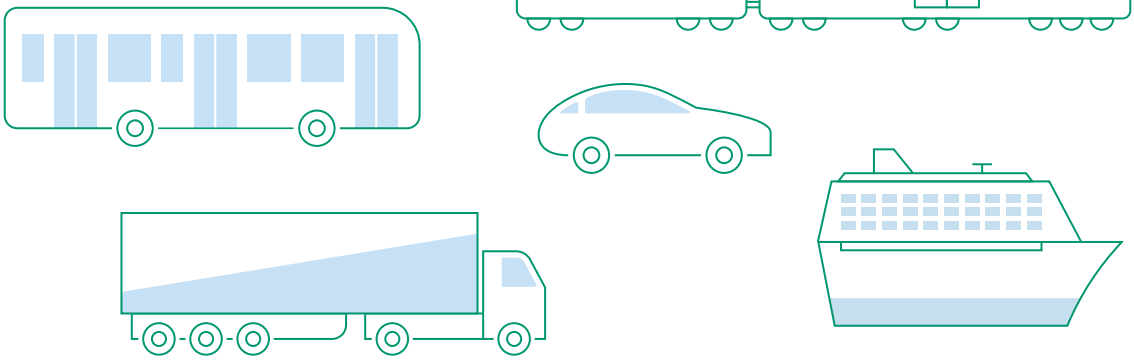
交通機関の直接・間接電化

風力エネルギーは、運輸セクターの直接的な電化と間接的な電化の両方に利用することができます。蓄電池へ貯蔵する電力源として
また、再生可能エネルギーからの水素や合成燃料と呼ばれる水素を利用した製品を製造するためのエネルギーとしても利用されます。

直接電化

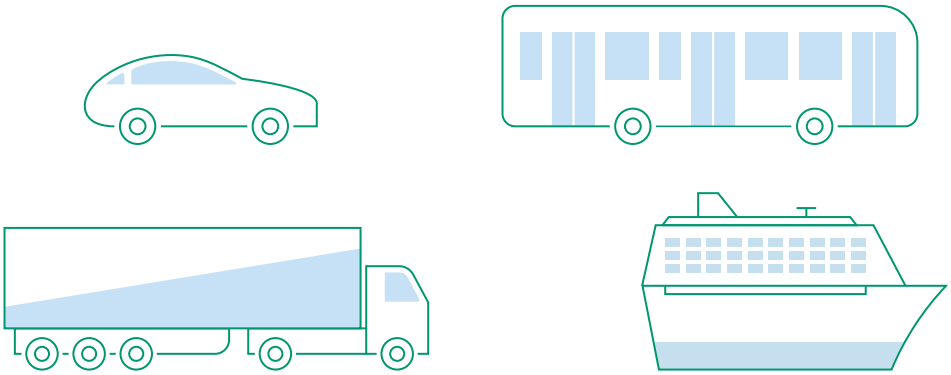
間接電化

電気



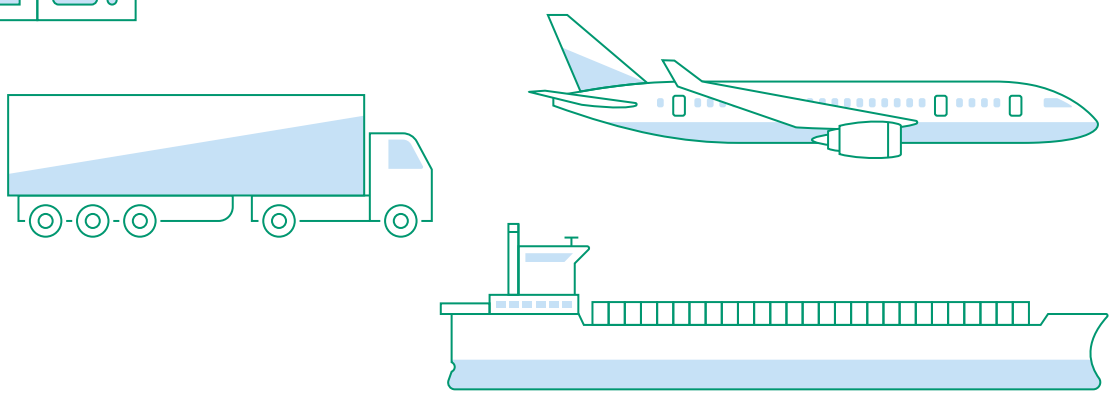
蓄電池

水素



燃料電池

合成燃料



内燃機関

* 図は説明のためのものであり、すべてを網羅するものではありません。

= 100 MW

この地図は、デンマークの洋上風力発電の設備容量の見込みを示したものです。実際に設置される風車の数を直接示すものではありません。

北海エナジー社(North Seas Energy Corporation)

現在、デンマークはオランダ、ドイツ、ベルギー、ルクセンブルク、フランス、アイルランド、スウェーデン、ノルウェーと、北海エネルギー協力（NSEC）を通じて洋上風力発電所の計画・建設に協力しています。この協力関係により、ベストプラクティスの共有、協調の強化、規制の調和が図られ、最終的にコスト削減が実現されています。今後、共同プロジェクトや複合プロジェクト、海洋の空間計画の調整、技術基準の調整などの必要性が高まると予想されます。

風力発電所(計画)

風力発電所(ポテンシャル)

エネルギー島

連系線(計画)

連系線(ポテンシャル)

第4章

デンマーク海域

広い海域と浅い海域、安定した風力資源を持つデンマークは、洋上風力の大きなポテンシャルを秘めています。
北海では、デンマークが最大10GWの洋上風力発電能力を持つ世界初のエネルギーハブを設置する予定です。

デンマーク海域（12海里ゾーン、排他的経済水域、内水面）の面積は105,000 km²で、大部分が浅い海域です。このため、オランダ、ドイツ、ポーランドの海域よりもはるかに広く、洋上風車の着床式基礎に理想的な海域です。洋上風力発電を低コストで実現するためには、風車の基礎となる着床式が必須となります。

デンマークは、英国、ベネルクス、ドイツ、ポーランドなどの電力需要地に近いため、洋上風力発電所を近隣の電力市場に直接連系できる可能性があります。EUが2050年までに設置を目指している300GWの洋上風力発電の設備容量の半分以上は、北海に設置されると予想されています。このうち大きな割合が、デンマーク海域でコスト競争力をもって設置される可能性があります。

エネルギー輸出国
現在、デンマークの年間の電力消費量は約35TWhです。直接・間接電化により、デンマークの排出量削減目標に合わせて、電力需要は2030年までに50～70TWhに増加すると予想されています。

2033年までにデンマークの洋上風力発電の設備容量は7GWに達し、2035年には最大40TWhを発電し、現在のデンマークの電力消費量を上回ると予想されています。つまり、デンマークは今後数十年の間に電力の純輸出国になるのです。

ハイブリッド資産
従来、洋上風力発電所は、海岸に直接接続して単一の放射状接続のプロジェクトとして計画・建設されてきました。しかし、2012年にデンマークがバルト海にKriegers Flak洋上風力発電所を建設することを決定したことで、この状況は一変しました。デンマークとドイツを結ぶ連系線と関連しており、いわゆる「ハイブリッド資産」です。

ハイブリッド資産は、洋上風力発電所で発電した電力を陸上まで運ぶと同時に、連系線としても機能するため、送電システムをフルに活用できるメリットがあります。風力発電所がフル稼働していないためにケーブルに余剰容量がある場合、Kriegers Flakの送電線は国際的な連系線として電力を輸出入し、デンマークとドイツの電力生産者と消費者に利益をもたらします。送電線の本数が少なくて済むことと、送電線の利用率が高いことで、プロジェクト全体のコストと投資額を下げることができます。

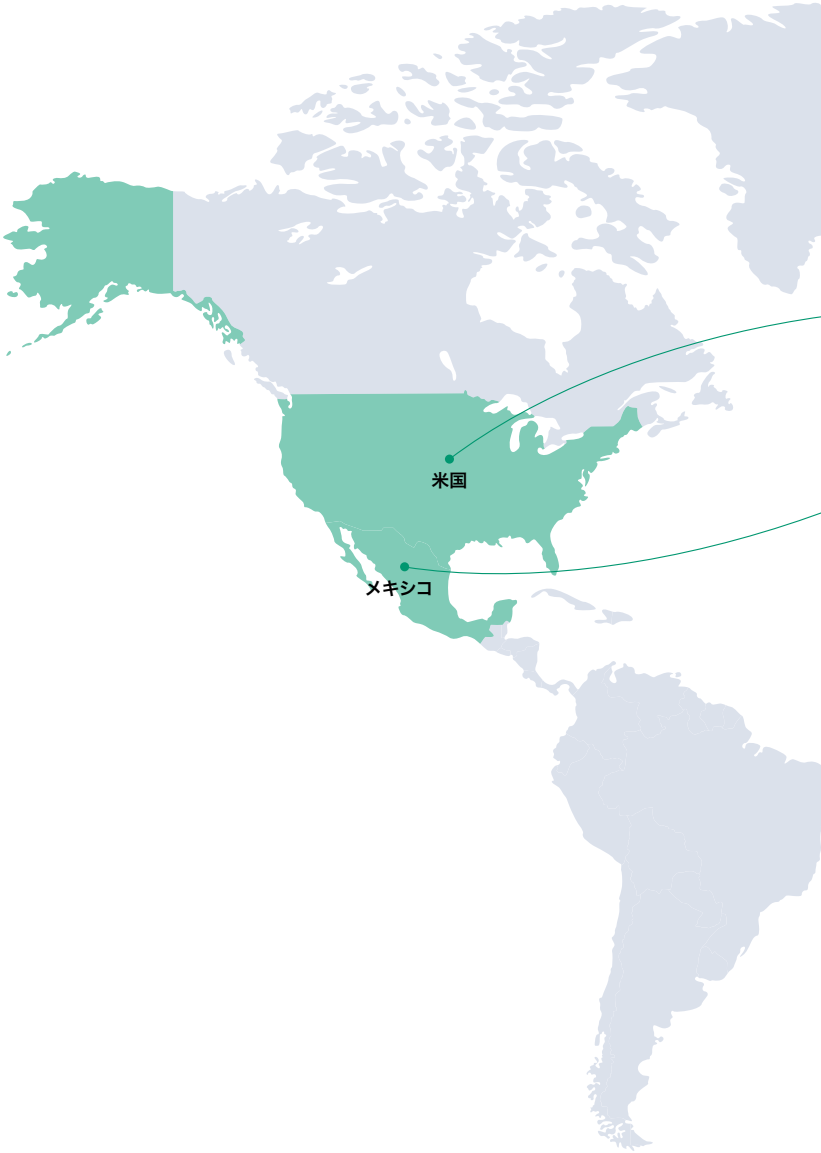
エネルギー・ハブ
洋上風力発電所が増加し、海岸からの距離が遠くなるにつれ、より多くのプロジェクトを洋上の「ハブ」または「島」に統合し変電設備を共有し、より多くの市場に連系することで大きな相乗効果を得ることができるようになります。デンマークは、このようなエネルギーハブを2つ建設することを目標としています。1つはバルト海のボーンホルム島で、デンマークとドイツの両方に接続される、初期の設備容量2GWの洋上風力発電所です。狙いは、このボーンホルム島を送電用変電所の固定プラットフォームとして利用することで、運用・保守の拠点にもなる可能性があります。このハブは、後に容量を増やし、ドイツやスウェーデンなどへも接続して拡張することができます。

第二のエネルギーハブは、ユトランド半島の西海岸から約80kmの場所に人工島として建設され、当初は約12万m²の面積で、2033年までに3GWの洋上風力発電に必要なインフラをサポートする予定です。フェーズ2では、人工島を最大46万m²まで拡張し、最大10GWまで対応する予定です。

第5章

強力な国際協力とパートナーシップ

デンマークは、19カ国との緊密なパートナーシップと政府間協力を通じて、デンマークのエネルギーモデルから学んだ教訓を共有し、世界の排出量削減を加速することを目指しています。



デンマークは、エネルギー・システムをブラックからグリーンへと移行してきた50年近い経験を有しています。この50年間、デンマークは経済成長と高い生活水準を維持しながら、化石燃料への依存度を減らし、気候変動を緩和する方法を示してきました。これは、デンマークのエネルギーモデルと呼ばれています。

そのバックボーンとなっているのが、野心的で長期的な展望と幅広い政策的支援を特徴とする政策的枠組みです。こうした経験は今、デンマークと共にデンマークのエネルギーモデルに基づいてエネルギーシステムの価値の最適化を目指す国々において、触媒として機能しています。

二国間協力

デンマークは、これまでの教訓を共有することで、国際的なグリーン転換を後押しし、海外の低炭素エネルギーセクターへの飛躍的な転換を支援しています。現在、デンマーク・エネルギー庁は、19の新興国および先進国と二国間協力を行っています。さらに、デンマークは「デンマーク・エネルギー転換イニシアティブ」を含む多くの短期の国別協力関係を結んでいます。

ドイツ、メキシコ、オランダ、ウクライナ、ケニア、ポーランド、イギリスなど、プログラムに風力エネルギーを含まないパートナーもいます。中国、インド、日本、韓国、フランス、トルコ、米国、ベトナムの関係当局とは、具体的な洋上風力の協力体制を構築しています。陸上風力発電については、デンマーク・エネルギー庁はエジプト、エチオピア、インドネシア、南アフリカと連携しています。これらの国々を合わせると、世界のCO_2 排出量の60%以上を占めることになります。

4つの専門分野

政府間協力の焦点は、安定した経済成長を維持しながら、地方自治体や関係機関のエネルギー・システムのグリーン移行を支援することです。デンマークのノウハウに基づき、パートナーは以下を中心に活動しています。

- 長期的なエネルギーモデリングと計画
- 再生可能エネルギーのための枠組み条件の強化
- 再生可能エネルギーの統合と電力セクターの柔軟性
- エネルギー効率と地域熱供給の推進

また、デンマークの送電事業者Energinetは、エネルギー安全保障を確保するための豊富な経験を持っています。多くの国のパートナーシップにおいて密接なパートナーとして機能しています。また、パートナー国の大使館も重要な調整役を担っています。

グリーンな開発の推進

より持続可能なエネルギー・システムへの転換を支援することで、再生可能エネルギーの導入が進み、グリーンソリューションの新しい市場が成熟していきます。これは、風力エネルギーやエネルギー効率の高いソリューションの市場開拓を支援し、グリーン投資家の障壁を減らすことにつながります。

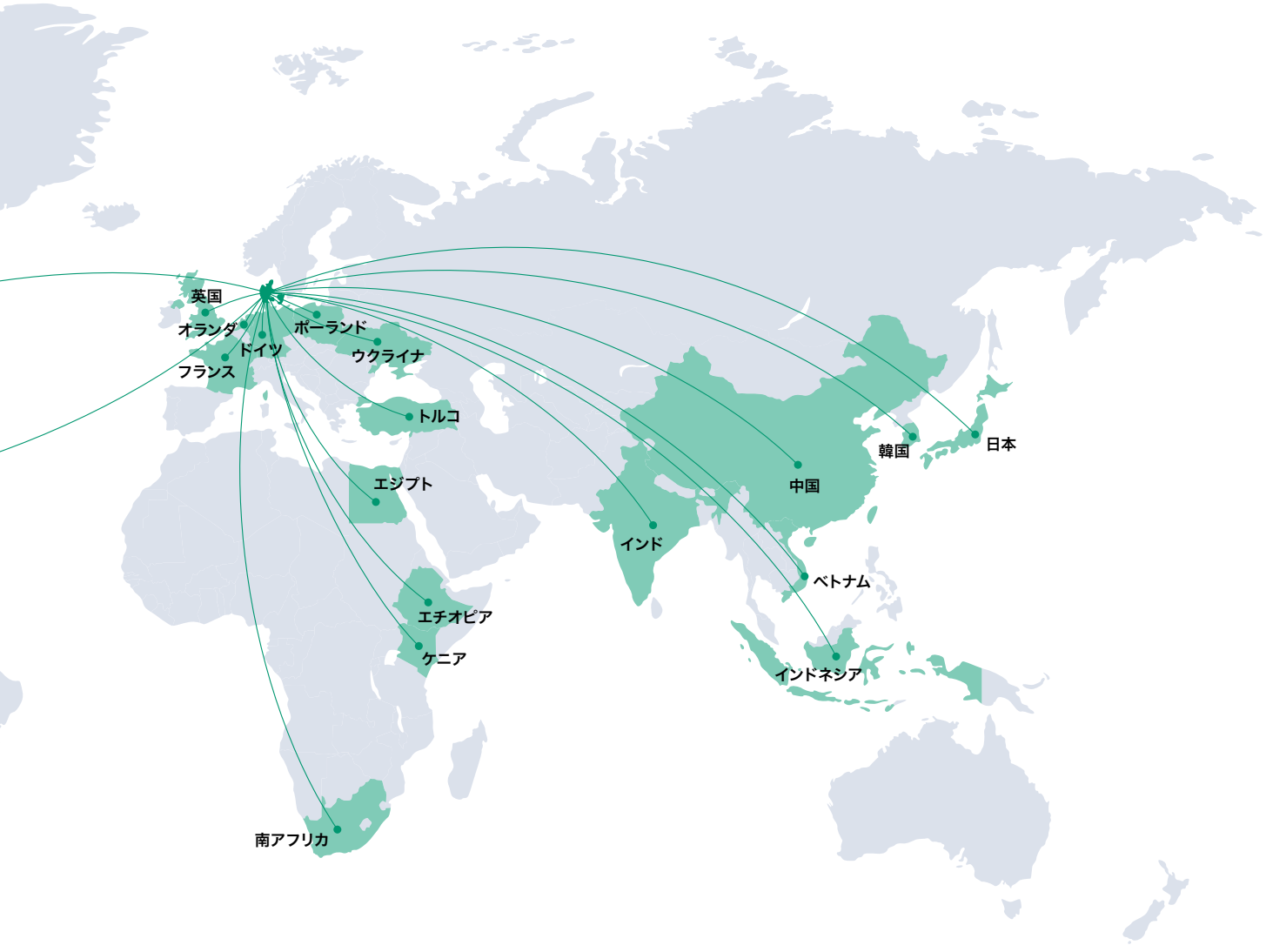


図2

デンマークは世界19カ国とパートナーシップを締結しており、これは世界のCO2 排出量の60%以上に相当します。

洋上風力発電の入札で米国と提携

2017年より、デンマーク・エネルギー庁は、エネルギーガバナンスパートナーシップ（EGP）を通じて、アメリカの海洋エネルギー管理局（BOEM）と正式に協力関係を結んでいます。このパートナーシップは、デンマークにおける洋上風力発電所の計画や規制関係に関する経験の共有に重点を置いています。2018年、EGPプログラムは、ニューヨーク州エネルギー研究開発局（NYSERDA）およびカリフォルニア州エネルギー委員会（CEC）と洋上風力に関する協力関係を開始しました。このコラボレーションでは、リスク管理、規制の合理化、環境緩和政策、長期計画、合意形成など、多様な洋上風力の入札に関する項目をカバーしています。2020年には、EGPプログラムはニュージャージー州公益事業局（NJ BPU）にも協力を拡大し、洋上風力と規制環境についても協力を行っています。

寄稿者

デンマーク・エネルギー庁

所在地

アメリカ合衆国、ニューヨーク

洋上風力でインドと提携

2021年、インドの新・再生可能エネルギー省とデンマーク・エネルギー庁は、洋上風力のセンター・オブ・エクセレンス(中核拠点)を設立しました。インドを拠点に、南・東アジアにおける再生可能エネルギーの主要拠点となることを目指します。洋上風力発電への包括的なアプローチを促進することを目的としたこの拠点は、投資家のリスクを軽減し、費用対効果の高いセクターに向けた首尾一貫した計画を進めることを目指します。インドのナレンドラ・モディ首相は、次のように強調しています。「デンマークには技術があり、インドには大きな市場がある。」

寄稿者

デンマーク・エネルギー庁

所在地

インド

第6章

洋上風力発電の入札の新時代

デンマークは洋上風力発電のパイオニアとして、リスクと規制の制約を最小限に抑えた最善の枠組み条件を開発するにあたり豊富な経験を有しています。政策的な後ろ盾もあり、デンマークは最小限の補助金で洋上風力発電を実現する未来に向かっています。

洋上風力発電は本質的に複雑なビジネスであるため、規制の枠組みをデザインする際には、計画の手順とリスク配分の両方が重要な問題となります。デンマークの洋上風力発電所の入札方法は、大規模な風力発電所の条件の設定における長年の経験の結果です。その基礎は、最初の洋上風力発電所Horns Rev 2の入札の発表に先立つ2002年に作られました。

自由度とリスク回避がポイント

デンマークの洋上風力市場を投資家にとってより魅力的なものにするために、透明性と自由度を確保することが優先されました。関係するステークホルダーを市場対話に招き、入札条件について議論しています。風力発電所の設計には完全な自由度が与えられています。落札基準は非常に明確であり、財務的・技術的に能力のある企業のみがプロセスに参加できます。

デンマークモデルのもう一つの原則は効率性で、ワンストップ・ショップのコンセプトによって実現されています。これはデンマークの法律に組み込まれており、洋上風力発電プロジェクトの開発において、初期の計画から試運転、運用まで、すべての段階においてデンマーク・エネルギー庁が窓口となっています。このアプローチにより、予期せぬ規制の壁が立ちはだかるリスクを軽減し、綿密な計画と関係省庁間の調整を強化することができます。

今後の洋上風力発電の入札に向けた新たな施策

長年にわたり、デンマークの枠組み条件は、市場での健全な競争をもたらし、その結果、コストを押し下げることになりました。

デンマークでは、最新の技術革新に対応するため、計画、規制、入札手続きの改善を常に目指しています。これらは、現行の規制がカバーできていない技術的な改善や、新たな資金源に対する規制の障壁などがあります。また、プロジェクトに不釣り合いなほど大きなリスクが想定され、結果としてコストを引き上げてしまうような問題もあり得ます。

現在、デンマーク・エネルギー庁は、コストを下げつつ、投資に対する高い安全性を確保するための新しい方法を導入しています。2020年のエネルギー合意の一環として、デンマーク議会の各政党は、2030年までに1か所あたり約1GWの洋上風力発電所を2か所設置することに合意しています。この協定の原則は、市場の状況に応じてグリーン転換に道を開くことです。そのため、現在進行中のThor洋上風力発電所（800-1,000MW）の入札には新たな施策が盛り込まれています。この入札では、新しい補助金制度（CfDモデル）と、系統接続部の建設に関して異なるインターフェースのソリューションが採用されています。これにより本入札では、開発事業者は系統接続に関連する設備の建設、所有、運営に責任を持つことができます。

2番目の入札であるHesselø洋上風力発電所（800-1200MW）は、200MWの増設可能オプションが事業者に与えられれば、デンマーク最大の洋上風力発電所となる可能性があります。また、蓄電池、エネルギー貯蔵、PtX設備を追加するオプションは、これまでの入札では適用されていないコンセプトです。両プロジェクトは、イノベーションを促進し、電力系統ソリューションを最適化し、最終的に洋上風力発電所の総コストを削減することも目的として、2027年までに運転開始の予定となっています。

「洋上風力発電のリスク低減とコスト削減のためには、枠組み条件のイノベーションが極めて重要です。洋上風力発電プロジェクトの収益性と融資可能性の鍵を握るのは枠組み条件です。洋上風力発電はデンマークで生まれ、30年以上にわたって風力発電所を建設してきた独自の経験をもとに、私たちは新しい方法で考えるべき時期に来ているのです。」

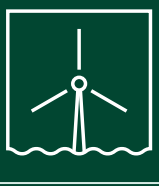
デンマークエネルギー庁長官 KRISTOFFER BÖTTZAUW

デンマークは、数十年にわたり風力発電の普及に努めてきたパイオニアです。1991年、世界初の洋上風力発電所がVindebyに設置され、設備容量は4.95MWでした。その30年後、デンマークはこれまでで最大の洋上風力発電所「Kriegers Flak」を設置しました。600MWの設備容量で、デンマークの60万世帯に電力を供給することができます。2030年までに、デンマーク政府の「2020年気候法」施行の一環として、さらに7GWの洋上風力発電を拡大する予定です。

写真提供：Vattenfall A/S

図3

デンマークの洋上風力の歴史的なマイルストーン



1991

デンマーク、Vindeby洋上風力発電所（5MW）で、世界で初めて風車を洋上へ設置する。その後、陸上の適地が少なく、浅い海域に風力資源が豊富にあることから、いくつかの小規模な実証プロジェクトが行われるようになった。

1996 -1998

2030年までに4GWの陸上風力発電を目標とする新エネルギー行動計画「エネルギー21」が開始された。電力会社に大規模な洋上風力発電の実証プロジェクトを義務付けることになり、2002年にHorns Rev 1、2003年にRødsand 1の事業が開始されることとなった。このプロジェクトにより、大規模な洋上風力の環境影響に関する研究が可能になり、海域計画や海域計画委員会のための基礎が作られた。最終的な目的は、海域に関連する紛争を減らし、予見可能性を通じて投資を促進し、環境を保護・改善することである。

2015

デンマーク・エネルギー庁は、さらなる技術革新とコスト削減を促進するため、最大50MWの洋上試験プロジェクトに対する支援制度を開始した。
デンマーク北西部海域の28MW実証プロジェクト「Nissum Bredning」に補助金が交付される。

2016

600MWのKriegers Flakを、協力的な競争と国際的な事業者のラインナップにより、49.9EUR/MWhで世界記録となる落札価格を達成。
デンマークとドイツの2国間に連系線を設置した初の洋上風力発電所となる。

洋上風力発電のコスト削減策として、近海の6つの海域で350MWの複数サイトの入札が行われた。入札価格が下がる一方で、地元の支持、視覚的な影響、環境アセスメントの重要性について重要な学びがあった。これは後に、洋上風力発電の計画を微調整したり、見直すために利用された。

1999

デンマーク政府が、2002年までにデンマークの電力市場を自由化することを決定。新規の洋上風力発電所の枠組み条件は、発送電分離と電力自由化から、市場指向の管理手段としての入札へと変化した。

2004

最初の洋上風力発の入札がHorns Rev 2とRødsand 2で開始され、当時としては世界最大の洋上風力発電所となった。洋上風力発電の開発において、入札を有効な手段として活用する新しいフェーズが始まった。

2013

Anholt洋上風力発電所の入札では、厳しい時間的制約、高い違約金、事前審査なし、英国洋上風力発電市場の成長によるサプライチェーンの弊害などにより、競争レベルが低く、新しい枠組み条件の必要性が示された。

2009

Avedøre HolmeとSprogøの両洋上風力発電所は、国連気候変動枠組み会議COP15の下でデンマークのグリーン転換を示すための実証プロジェクトとして建設された。

2018

デンマーク議会は、2030年までに総エネルギー需要の55%を再生可能エネルギーで賄うというエネルギー合意を全会一致で可決する。この協定には、2030年までに建設される3つの大規模な洋上風力発電所（ThorおよびHesselø）が含まれている。

2020

デンマークは、2030年までに温室効果ガス排出量を70%削減する気候法を可決。デンマークの幅広い政党の連合が、2つのエネルギー島とそれに付随する洋上風力発電所の設置を決定する。一つは北海に浮かぶ人工島、もう一つはバルト海に浮かぶボーンホルム島に設置される。

デンマークの世界的な広がりを示す一例として、デンマークと韓国のエネルギー機関の強固な協力関係があります。ウルサン広域市は、Esbjerg市との協力協定により、Esbjerg港のような国際的な洋上風力発電の基地港を目指しています。この協力関係は、デンマークのユニークな洋上風力発電の経験と強力な産業が、他国の野心的なエネルギー計画において重要な役割を担っていることを明確に示しています。2020年、ウルサン市のSong Cheol-Ho市長（左）とEsbjerg市のJesper Frost Rasmussen市長（右）。

写真提供：Esbjerg Municipality

第7章

風力エネルギーの経済効果

風力エネルギーは、社会経済的にプラスの効果があることが十分に証明されています。雇用の創出から輸出まで、風力エネルギーはデンマーク経済の中心的役割を担っています。

2019年、デンマークの風力産業は33,159人を直接雇用し、デンマークの民間雇用全体の2%以上を占めています。間接的には、風力産業は関連する産業でさらに63,000人の雇用を支えています。風力産業は税収にも大きく貢献しており、一次バリューチェーンを通じて2018年に138億DKK（19億ユーロ,2500億円）が徴収されています。

風力産業から経済的な恩恵を受けている自治体は全国にいくつかあります。デンマーク第二の自治体であるオーフスは、2018年に風力産業から1億3800万DKK（1860万ユーロ, 24億円）の自治体所得税を受け取りました。所得税で第3位の自治体であるRingkøbing-Skjernでは、自治体の税収の5%以上を風力発電産業の従業員から得ています。

デンマークでは、風力発電の社会経済的利益は主に陸上風力から得られており、現在でも風力発電の設備容量の大半を陸上風力が占めています。このことは、陸上風力が引き続き重要であることを示しています。一方、洋上風力発電の効果も高まっています。2010年、洋上風力発電はデンマークの風力発電会社の売上高全体の20%を占めていましたが、2020年には、その割合は40%に増えました。

新規の大規模発電設備と雇用の創出

2020年、洋上風力発電の社会経済的効果が初めて文書化されました。その結果、1GWの洋上風力発電は、デンマークのサプライヤーに直接、間接、派生的な雇用効果から、14,600人年に相当する雇用を創出することが明らかになりました。デンマークの風力エネルギーの導入計画には、およそ10GWの新規導入が予定されており、その過程で多くの雇用が創出されることが期待されています。

海岸線が長いこともあり、洋上風力発電の経済効果はとても大きなものです。特に、Kattegat海のグレナ(Grenå)、北海のHvide Sande、バルト海のRønneのような港湾では、風力エネルギーが地域経済に大きく貢献し、成長と発展の機会をもたらす事例となっています。デンマークの洋上風力発電の野心的な拡大計画により、国内のすべての地域が社会経済的な効果を享受することができます。

また、欧州の洋上風力発電の市場においても、デンマークの企業は40%の市場シェアを持ち、強い存在感を示しています。欧州の洋上風力発電の拡大は、デンマークの雇用創出に大きな影響を与えています。実際、EUで1GWの洋上風力発電の投資が行われるごとに、デンマークでは9,100人年の労働力が創出されるという試算があります。2050年に向けてEUでは450GWの風力発電が計画されており、デンマークの風力発電産業は大きな可能性を秘めているのです。さらに、風力発電所が設置される場所では、設置、運転、メンテナンスに関連する多くの雇用を地元にもたらすのが一般的です。

輸出産業の柱となる風力エネルギー

エネルギー関連技術とサービスは、デンマークの輸出において鍵となっており、2019年のデンマークの総輸出財のほぼ14%を占めるに至っています。また、今年は風力エネルギー関連技術・サービスの輸出額が685億DKK（92億ユーロ、1兆1200億円）となり、新記録を達成しました。これは、デンマークからのエネルギー関連技術の輸出総額1227億DKK（165億ユーロ、2兆1500億円）の半分以上を占めています。

風力エネルギーの輸出の増加は、デンマークのエネルギー技術輸出の増加*[1] と、世界的な風力発電需要の増加の両方からもたらされたものです。エネルギー関連技術やサービスの輸出に重点を置くことで、デンマークと海外のパートナーに貴重な機会がもたらされています。

[1] 地域熱供給、バイオエネルギー、その他の効率的なエネルギー形態を含む。

第8章

風車についての基礎知識

デンマークでは、陸上に4,100基以上の風車（25kW以上）、洋上に630基の風車が設置されています。2021年8月、風力発電の設備容量はほぼ6.9GWに達しました。

近年、デンマークの電力消費量に占める風力発電の割合は、2004年の18%から着実に増加し、2020年には46.1%になりました。2030年までに、風力エネルギーは電力消費量のほぼ7割をカバーすることが期待されています。

デンマークは近隣諸国と密接な関係にあり、1時間単位で電力の輸出入を行っています。

2020年、デンマークの平均的な消費電力(kWh)の内訳は、66%が風力、水力、太陽光発電、8%が石炭、16%が廃棄物、バイオマス、バイオガス、6%が天然ガス、3%が原子力、1%が石油という構成になっています。

2020年に設置される風車の寿命は少なくとも25年です。

そのライフサイクルでは、製造、輸送、設置に使われたエネルギーの最大40倍ものエネルギーを生み出すことができるのです。

デンマークは電力供給の安全性が非常に高い国です。デンマークでは99.997%の割合で電気が使えます。

デンマークでは、電力系統で最も風力発電の割合が高かった月は2020年1月でした。この月は電力消費量の平均で66%が風力発電で賄われていました。

風力発電の割合が過去最高となった日は2020年2月6日で、1日の国内電力消費量の115%を風力発電で賄いました。

1時間値の風力発電の割合が最も高かったのは2020年4月13日で、国内の電力消費量の165%を風力発電で賄いました。

図4

デンマークの風力発電の設備容量とシェア 1990-2030年

出典デンマーク・エネルギー庁, KF21(frozen policy)

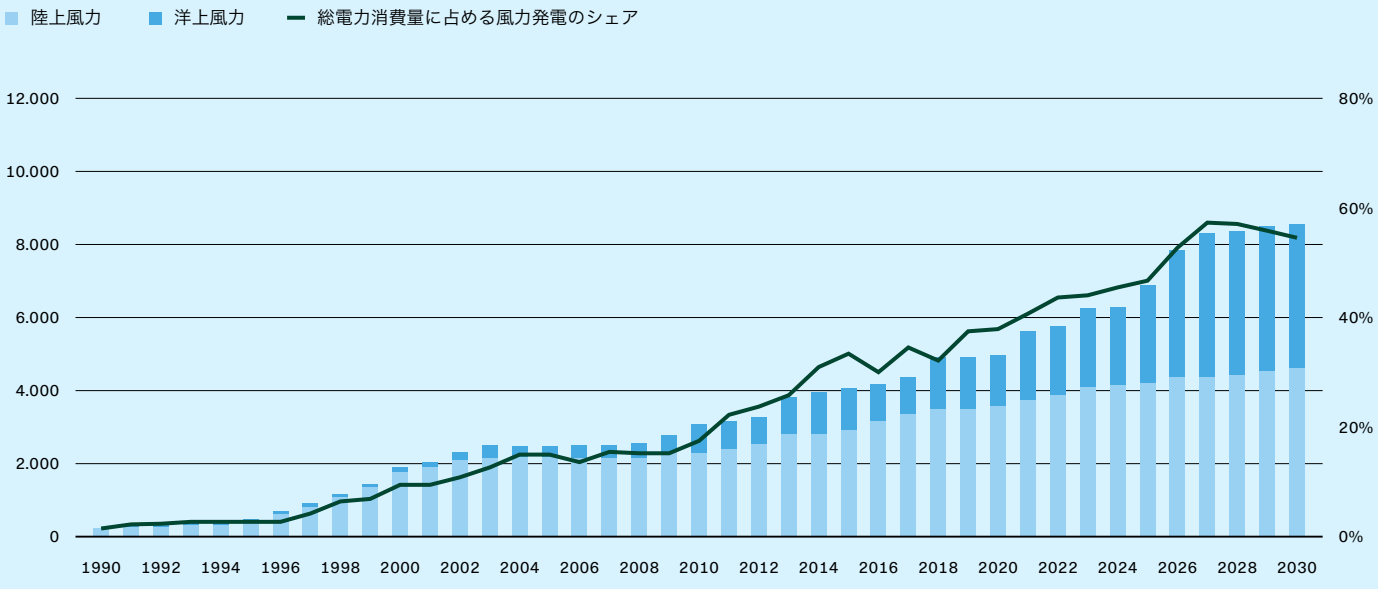


図5

風車についての基礎知識

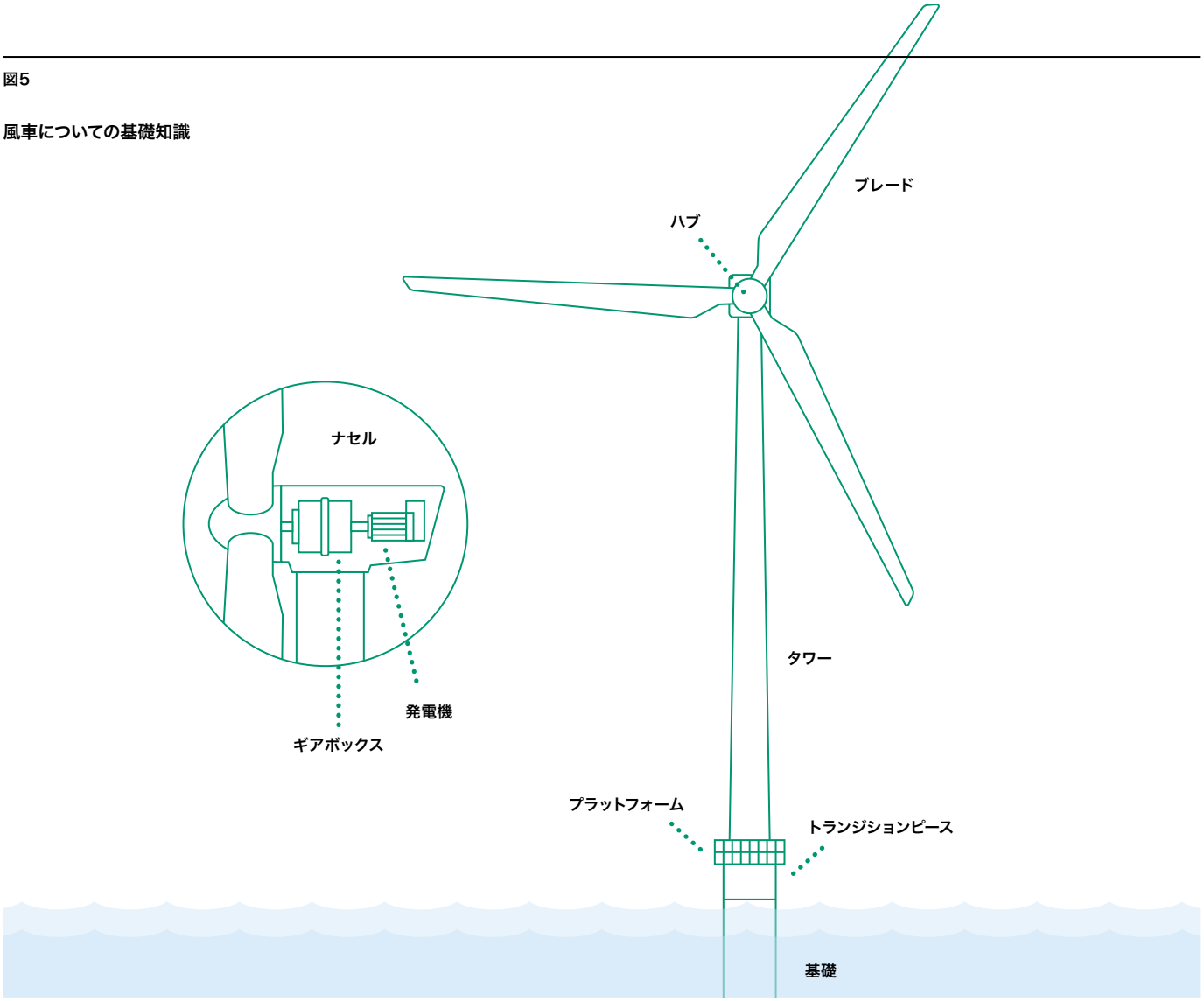


図6

さまざまな種類の基礎構造

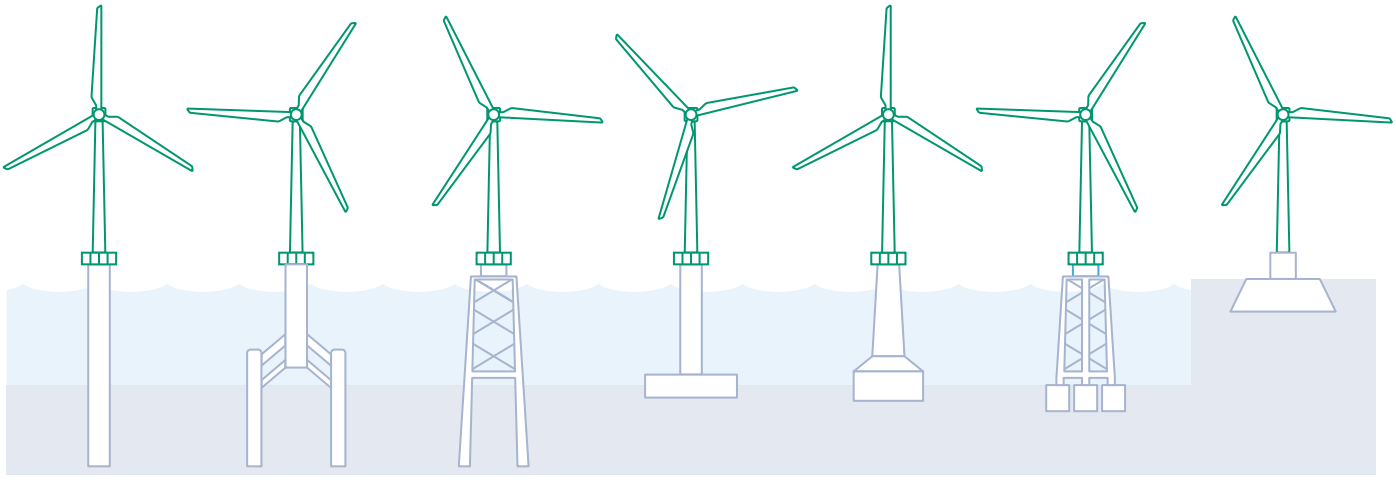
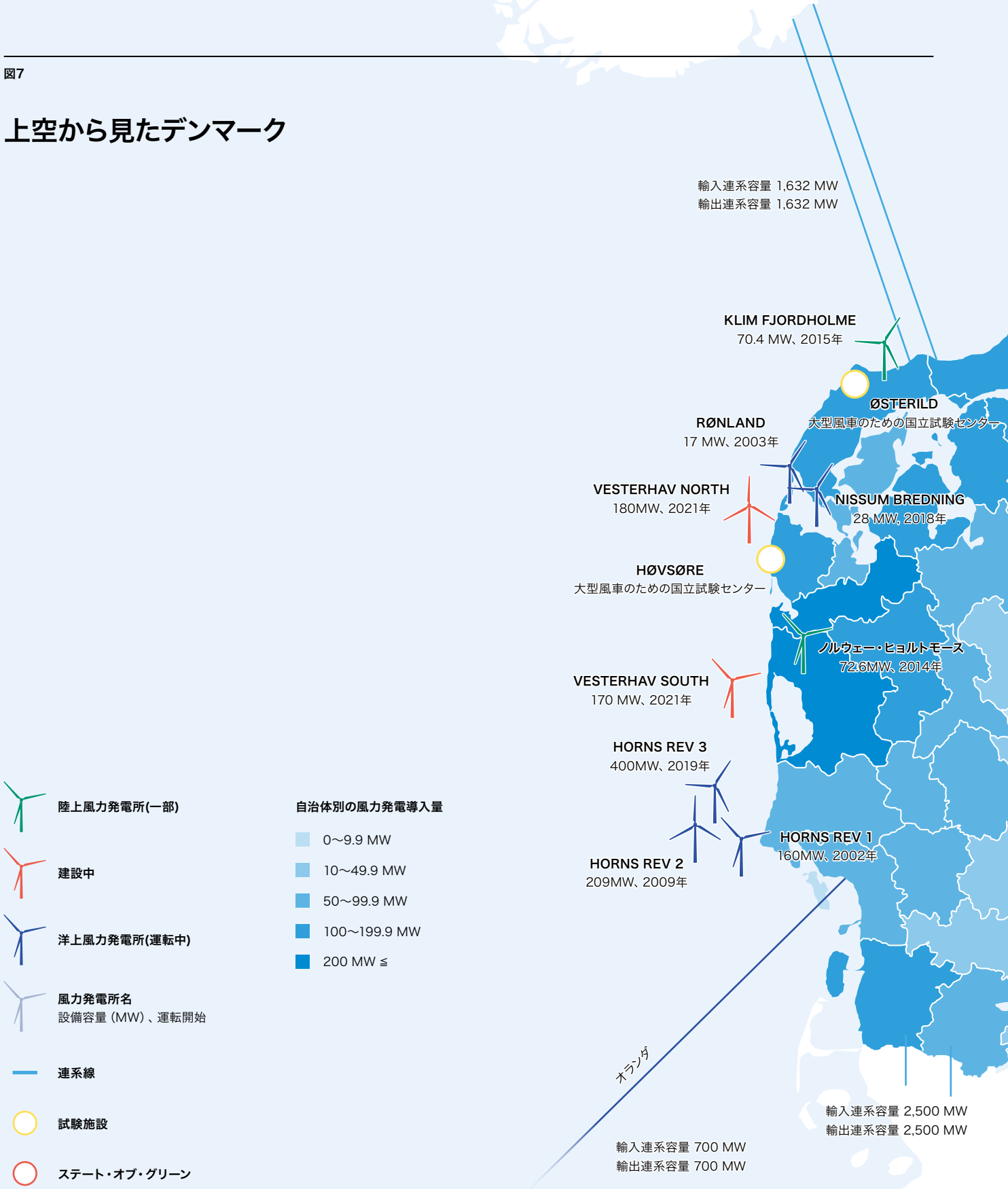


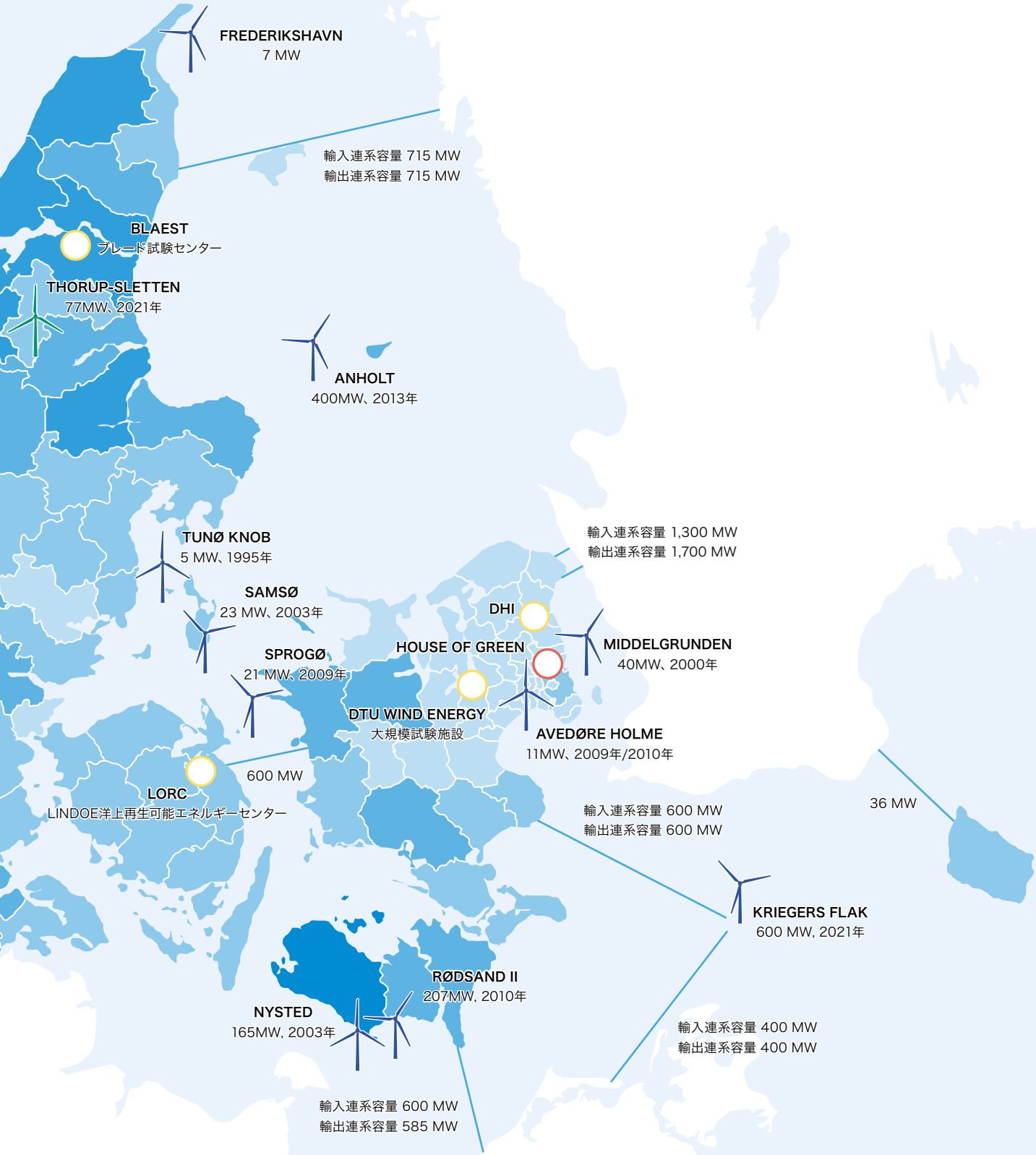
図7

上空から見たデンマーク



デンマークの陸上風力発電の設備容量
4,593 MW

デンマークの洋上風力発電の設備容量
2,306 MW


FREDERIKSHAVN
7 MW
輸入連系容量 715 MW
輸出連系容量 715 MW
BLAEST
ブレード試験センター
THORUP-SLETTEN
77MW、2021年
ANHOLT
400MW、2013年
TUNØ KNOB
5 MW、1995年
輸入連系容量 1,300 MW
輸出連系容量 1,700 MW
SAMSØ
23 MW、2003年
DHI
MIDDELGRUNDEN
40MW、2000年
SPROGØ
21 MW、2009年
HOUSE OF GREEN
DTU WIND ENERGY
大規模試験施設
AVEDØRE HOLME
11MW、2009年/2010年
600 MW
LORC
LINDOE洋上再生可能エネルギーセンター
輸入連系容量 600 MW
輸出連系容量 600 MW
36 MW
KRIEGERS FLAK
600 MW, 2021年
RØDSAND II
207MW, 2010年
NYSTED
165MW, 2003年
輸入連系容量 400 MW
輸出連系容量 400 MW
輸入連系容量 600 MW
輸出連系容量 585 MW

第9章

NIMBYからPIMBYへ

ゼロ・カーボン社会への移行は、私たちを取り巻く環境を目に見える形で変化させます。再生可能エネルギーで動く社会がもたらす変化に、誰もが納得し、未来に向けて役割を担っていくことになるのです。

デンマークの人々の多くは、再生可能エネルギーの種類にかかわらず、グリーンな転換を支持しています。デンマーク人は風景の中に風車を見慣れており、特に陸上風車は1970年代から設置されているため、なおさらです。

送電線、大規模太陽光発電所、バイオガス設備、風力発電所など、その設置計画は地元でしばしば議論されます。「なぜ、他の場所ではなく、ここに風車を設置するのか」。このような考え方は、しばしば「Not In My Back Yard」(私の家の裏庭には御免だ)というNIMBY効果と呼ばれています。グリーンインフラは常に見えないところに設置できるわけではないので、デンマークでは新しいインフラ投資に対して、地元の人々がNIMBYからPIMBY"Please In My Back Yard"(ぜひ私の家の裏庭に)と思えるよう支援する取り組みが行われています。

地域の支援と関与の活性化

デンマークでは、グリーン転換は民主的なプロセスであり、誰もが参加し、声を上げることができます。すべての陸上風力発電の設置は、地元レベルで議論され、地方自治体によって承認されます。これまでの経験から、早期の関与が地元での新しい陸上風力発電プロジェクトへの支援の確立に重要であることが分かっています。風車が設置される地域社会で、オーナーシップ(当事者意識)が生まれるのです。

また、「グリーンファンド制度」では、風力発電所の所有者は関連する自治体に1MWあたり1,700～22,000ユーロ(約22万円～290万円)を一括で支払うことが義務づけられています。この資金は、自治体が地域の新しい取り組みや開発に投資するためのものです。これにより、新しい陸上風力発電所の設置は、地域経済への貢献と、よりクリーンな環境への道を開くことになるのです。

共同所有とボーナス

地域の環境への取り組みを支援するために、デンマークの当局は、協同組合による所有モデルを通じて、自分たちの風車の購入を希望する市民に対して「グリーンローン保証」制度を提供しています。

この融資保証ファンドは、グリーン転換に積極的な役割を果たそうとする市民の投資判断をスムーズにするために設立されたものです。

さらに、風車の頂上高さの8倍以内の距離に住む近隣住民には、風車の発電分の一部を活用した「再生可能エネルギー・ボーナス」が支給されます。このボーナスは、近隣住民の協力と好意に報いるものです。

不動産所有者への保証

また、デンマークの当局は、近隣に風車が設置されたことにより不動産価値が低下したと考えられる不動産所有者を救済します。価値の損失が不動産総価値の1%以上であれば補償されます。不動産所有者を救済します。価値の損失が不動産総価値の1%以上であれば補償されます。

資産価値の損失の枠組み施策では、風車の近く(高さの4～6倍)に住む不動産所有者が「買い取りオプション制度」を申請し、発電開始から1年以内に自分の不動産を風車の所有者に売却することができるようになっています。この保証の枠組み施策は、価値の喪失を感じる市民の権利を保証するだけでなく、事業開発者にとっても、プロジェクトが無事に施工されることを保証するものです。

陸上風力発電に関する一般的な要求事項

- 風車は、近隣の土地から最低頂上部高さの4倍の距離を確保しなければならない。
- 風車から近隣への影は、年間10時間以内でなければならない。
- 住宅地/住居の騒音規制値は、39dB（風速8m/s）、37dB（風速6m/s）。
- オープンな地形での騒音規制は44dB（風速8m/s）、42dB（風速6m/s）。
- 低周波騒音は20dBを超えてはならない。低周波騒音の制限は、すべてのエリアで、風速6m/sと8m/sの両方における騒音レベルの計算値に適用される。

詳しくは、https://eng.mst.dk/air-noise-waste/noise/wind-turbines

2019年、Hirtshals市はデンマーク初の補助金を活用しない陸上風力発電プロジェクトの設置場所となり、歴史を刻みました。Hirtshals港に位置するこの風力発電所の4基のV136-4.2MW風車は、市民および企業の地元出資のみで賄われています。このオーナーシップ・モデルと、プロジェクトに対する地元の大規模な支援は、風力エネルギーと地元の成長がいかに密接に関係しているかを示しています。

写真提供：Hirtshals港

風車の健康への影響をめぐって、デンマークで55万3千世帯を対象とした5年間の科学的調査が行われました。その結果、デンマーク保健局は、風車からの騒音と調査された健康影響との間に直接的な関連はないと結論づけました。

第10章

風車の騒音による影響

デンマークの科学者たちは、風車からの騒音が人の健康に対して特定の条件で影響するかどうかについて、複数年にわたる調査を実施しました。2019年に終了したこの種の最も包括的な研究では、風車の騒音と人間の健康との間に直接的な関連性があるという決定的な証拠は見つかりませんでした。

デンマークでは1970年代から陸上に風車を設置していますが、それと並行して、デンマーク当局は長年にわたって市民の健康に関する膨大なデータと、設置されたすべての風車の位置とメーカーに関する正確なデータを蓄積しています。

風車による騒音と健康との関連は確認されていませんでしたが、デンマーク保健局は、2014年から2019年にかけて大規模な全国健康調査を実施し、風車の騒音が健康に与える影響について疑念や懸念を払拭するよう命じました。

この5年間、デンマーク癌協会は、風車からの騒音と、糖尿病、心血管疾患、出産時の有害事象、抗高血圧薬の影響、心筋梗塞、脳卒中、睡眠薬や抗うつ薬の影響のリスクとの関連性を調査しました。デンマークの最高医療機関であるデンマーク保健局は、この研究で作成された6つの医学研究論文には、風車の騒音への曝露と健康への悪影響との関連性を示す決定的な証拠はないと結論付けました。そのため、デンマーク当局は法律を変更する理由はないと判断しました。

研究方法はコホート調査で、設置された風車から半径6kmの地域に住む25歳から84歳のデンマーク人全員を対象として1980年から2013年の間に最低1年間実施されました。この調査には、7,500基の風車の気象・騒音データも含まれており、合計で553,000世帯が含まれています。

新型の風車からの騒音は小さくなっている

この調査以降、風車の技術開発はさらに進み、騒音レベルも改善されました。現在の風車は、ナセルに遮音材を使用し、構成部品は構造全体を通して騒音が拡散しないように設計されています。また、ギアや発電機も、ブレードの回転音を中心に、できるだけ騒音が小さくなるように取り付けられています。

1980年代の100kWクラスの風車と1990年代の500kWクラスの風車がともに100dB前後の騒音レベルであるのに対し、現在の陸上風車は開けた地形(オープンランドスケープ)の中に設置しても最大44dBしか騒音を発生しません。これに対し、一般的な会話の音圧は60dB、10m先を通過する車の場合は75dB程度です。

騒音規制

- 住宅地/住居の騒音規制値は39dB(風速8m/s) と37dB(風速6m/s)
- オープンな地形での騒音規制値は44dB(風速8m/s)と42dB(風速6m/s)
- 低周波騒音は20dBを超えてはならない。低周波騒音の制限は、すべてのエリアで、風速6m/sと8m/sの両方における騒音レベルの計算値に適用される。

第11章

風力エネルギー技術のレベル向上

デンマークは、風力エネルギーのパイオニアとして世界的に有名です。このことは、130年にわたるデンマークの風力エネルギーの付加価値連鎖の中で開発されてきたノウハウと能力を基にした、風力発電産業の技術的な飛躍と密接に関係しています。

経験とイノベーション、そして将来の技術を高度に統合することで、デンマークは風力エネルギー技術のハブとなりました。

未来の主力は「デンマーク製」
風車は大型化すればするほど、その効率やパワーも向上します。過去10年間で、最新の風車は大幅に規模を拡大し、より長いブレード、より高いタワー、その他のより洗練された構成要素が、より高い発電出力を可能にしました。

地理的距離が短く、インフラが整備され、高度な技術を持つ労働力を持つデンマークには、新しい風力エネルギー技術の研究、開発、試験、実証を行うためのユニークな環境が整っています。これを支援するため、デンマーク政府は陸上および洋上風車のフルスケール試験を行うための世界有数の2つの試験場の設立を許可しています。ØsterildとHøvsøreの試験センターです。

フルスケールの試験設備を利用することで、メーカーは、新しい風車技術が実際の運転条件下でどのように機能するかを判断することができます。また、試験センターのプロトタイプ風車はデンマークの電力系統に接続されているため、メーカーは風車プラットフォームと電力系統の相互作用を綿密に測定・評価することができます。

デンマークで始まった革新的なプロジェクト
変化の激しい風力発電産業の競争力を維持するためには、革新的な研究開発環境を育成することが重要です。

DTU Wind Energyでは、浮体式風力発電の分野で革新的な取り組みが行われており、2020年には新しいタイプのプラットフォームのテストが開始されました。デンマーク・イノベーション・ファンドは、1,580万DKK（210万ユーロ、2.7億円）を投資しました。このプロジェクトは、浮体式風車の基礎の設計を開発し、最適化するものです。その他にも、ZEBRAというプロジェクトでデンマークのLMウインドパワー社を中心に、風車生産における二酸化炭素排出量を削減し、環境負荷を低減するための取り組みが行われています。デンマークでは、洋上風車の基礎プラットフォームが魚の人工岩礁や産卵場として機能することまで検討し始めています。つまり、イノベーションは業界全体の持続可能性を向上させるための重要な推進力なのです。

このように多様化した研究テーマから、風力エネルギーのイノベーションには包括的なアプローチが必要であることがわかります。

デンマークの企業から始まる標準化
風力エネルギーの競争力を確保するために、もう一つ同様に重要なポイントが製造コストです。標準化の努力は、均等化エネルギーコスト（LCoE）を下げ、風力エネルギーを今日の再生可能エネルギーの中で最も実行可能で費用対効果の高いものとする上で極めて重要でした。

APQP4Windは、風力発電産業の「応用製品品質計画」の標準化に取り組むデンマークの組織で、ここ数年、品質評価に対する標準的なアプローチの急速な進展に貢献しています。シーメンス・ガメサ(Siemens Gamesa)社とベスタス(Vestas)社を中心とした産業間コラボレーションにより、APQP4Windは世界の風力発電産業が活用できる共通の品質保証手法を開発し、品質低下に伴うリスクとコストの低減に貢献しています。デンマークで始まったこの取り組みは、現在では世界中の企業が独自の生産工程にこの枠組みを適用するためのトレーニングや認証を受け、グローバルに展開されています。これにより、風力エネルギーのコスト削減を世界規模で推進することができます。

図8

陸上風車

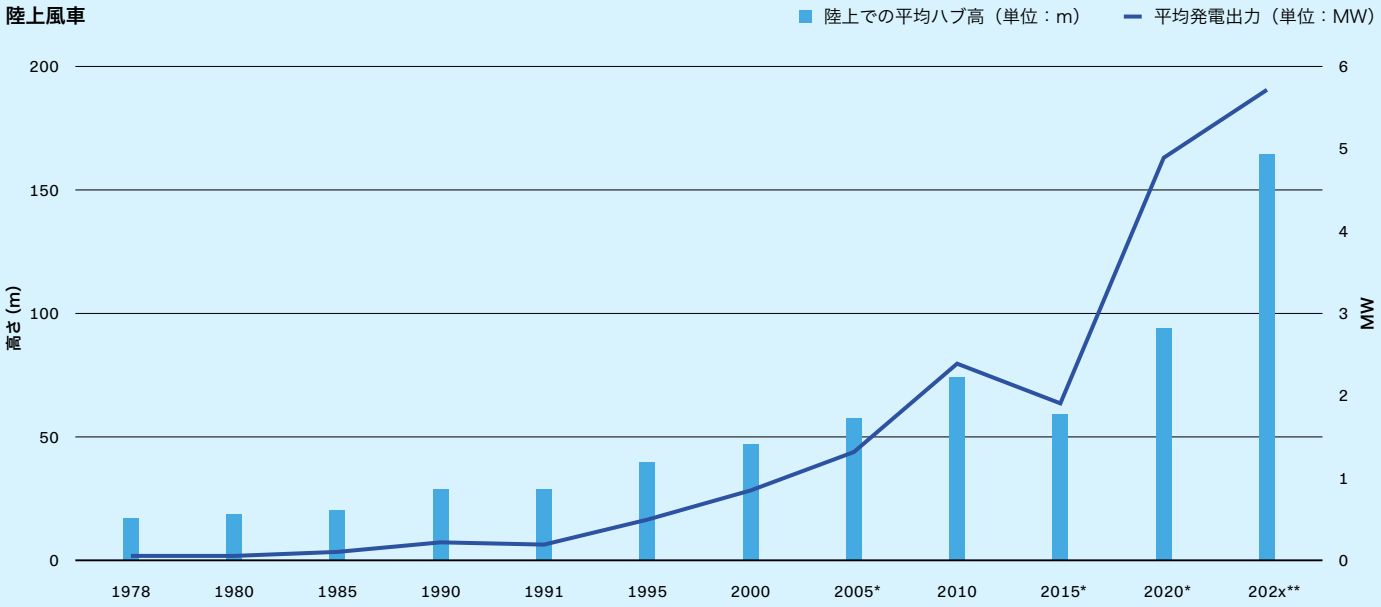
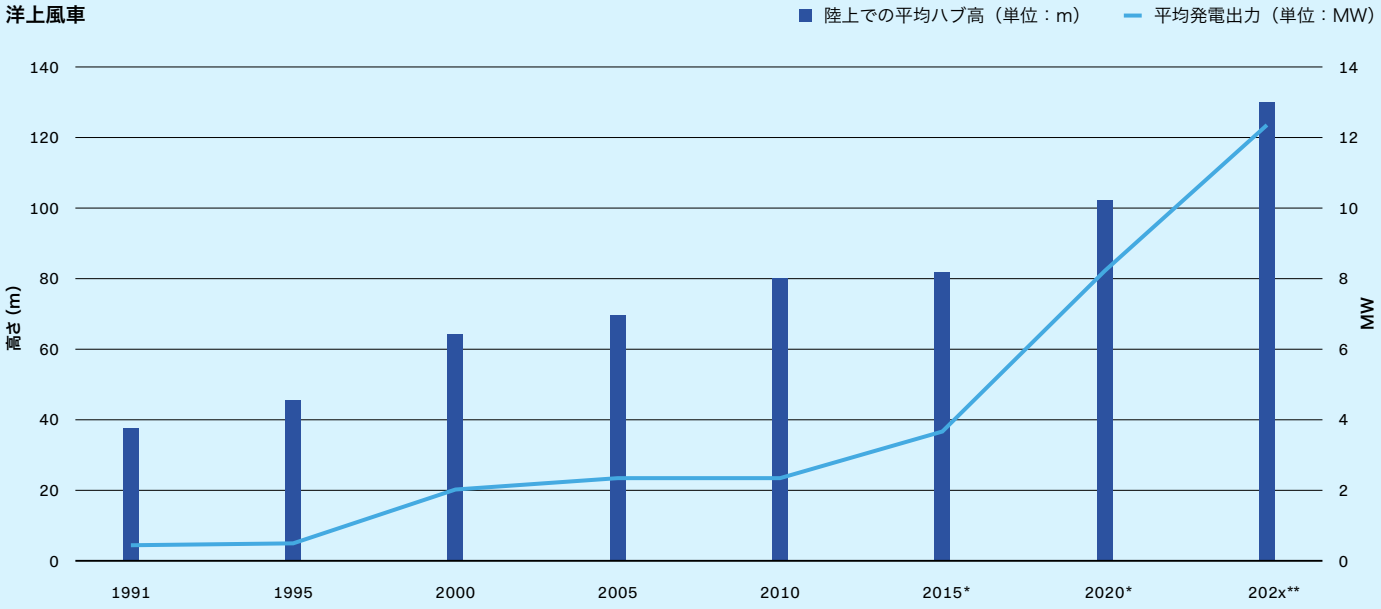


図9

洋上風車



風力発電の急速な発展と利用率の向上に伴い、風車のサイズと設備容量が大幅に拡大しています。2020年、2021年には、いくつかのメーカーが、過去最高の頭頂部高さとプラットフォーム設備容量が15MWに達する風車を発表しました。

注：データはすべて風車の設置年ベースであり、使用中および廃止された風車が含まれる。

* その年に洋上風車の設置がなかったため、最新の設置台数を記載しています。2005年は2003年、2015年は2013年、2020年は2018年のデータを利用。

** これらの数値は、GE、ベスタス、MHIベスタス、シーメンス・ガメサが洋上および陸上市場で今後発表する最大級の風車に関する公表済みの情報に基づいています。

第12章

未来の風車を試験する

風力発電産業の好調を維持するためには、試験設備が重要な鍵を握っています。デンマークでは、企業が世界クラスの試験施設を幅広く利用することができ、風力発電産業が新たな国際基準を設定し、その限界を押し広げることができるよう、独自の体制を整えています。

風力発電産業の競争力を維持し、技術革新と知識の共有を促進するためには、高品質の試験・実証設備へのアクセスが重要な鍵となります。デンマークは長年にわたり、世界の風力発電産業における試験・実証プロジェクトの拠点として、さまざまなニーズに対応した複数の施設を有しています。デンマークの産業界、公的機関、学術コミュニティの高度な協力体制が、この発展に重要な役割を果たしました。

適切な試験設備へのアクセスが部品の品質を保証し、風力発電の均等化エネルギーコスト(LCoE)低減に貢献しています。
風車の各コンポーネントを精力的に試験し、プロトタイプの風車を部分的およびフルスケールで試験することで、潜在的な設計や製造の誤りを開発段階で特定し、排除することができます。これは、風車が大量生産され、世界中の市場に設置された後に修理対応を行うよりもはるかに安上がりです。

そのため、新しい技術やソリューションの開発には、試験・実証設備が欠かせません。

その分野で世界をリードしていることの証
ユトランド半島の西海岸には、世界最大級の本格的な試験施設が2つあります。Høvsøre試験センターとØsterild試験センターです。両センターはDTU Wind Energy(デンマーク工科大学の一部)が運営しており、Vestas、Siemens Gamesa、GE Renewable Energy、Nordex GE-Alstöm、Envision Energyといった風車メーカーの試験台(テスト・スタンド)が置かれています。この2つの施設は、デンマークの風力発電産業の試験・実証能力を示しています。

それぞれの施設の2002年と2012年の設立以来、急速な技術開発の進展に伴い、新型風車の大型化に対応するため、試験台の数を増やすとともに、対応できる高さを増してきました。

緊密な連携で、独自のダイナミクスを実現
試験施設があることはもちろんですが、民間企業と有名な研究機関との間のユニークな関係により、市場ニーズ、研究開発、試験が共生しています。試験センターと産業界の密接な協力関係の一例として、オールボーにあるデンマーク・ブレード試験センター(Danish Blade Test Centre, 通称 Blaest)があります。2019年には、Vestas社のブレードのフルスケール試験に関する長期契約が締結され、最大100mのブレードを試験できる3つの試験装置を備えた新しい試験場への投資への道が開かれたのです。

もうひとつの例は、DTU Risø Campus(DTU Wind Energyのメイン拠点)で、もともとは政府出資の科学研究機関としてスタートしました。この研究センターは現在、デンマーク工科大学傘下の研究所として、再生可能エネルギーのための最先端設備を備え、成功を収めています。

これらの事例が示すように、官・民・学が密接に連携することで、競争力のある試験施設を確保し、産業全体に利益をもたらすことができるのです。デンマークの場合は、世界の風力産業のハブとして、また明日の風力エネルギーのバリューチェーンの強力な地位を確立することができたのです。

「デンマークの試験環境こそ、ユニークであるだけでなく、
デンマークが風力エネルギーの分野で技術革新と開発の
世界的拠点となる道を切り開いた立役者なのです」

JAN HYLLEBERG (CEO, WIND DENMARK)

柔軟性が高い施設で過酷な条件にも対応

Odense(オーデンセ)市の古い造船所であるLindø埠頭には、信じられないほど多目的な試験設備があります。洋上風力発電の分野における貴重な経験と必要な設備を備えた独自のインフラを組み合わせたLindø Offshore Renewables Center(LORC)は、ナセルや洋上機器を極限状態で試験や加圧を行う場所となっています。LORCの3つの試験施設では、ナセルの高出力試験、ライフタイム運転試験、系統コンプライアンス試験ができ、最大25MWのコンポーネントを試験することができます。LORCは、極限気象試験や機械試験も行っています。LORCのガントリークレーンに代表されるユニークなインフラは、非常に重い機材を移動させることができ、試験エリアの屋根は取り外し可能なため、機材の移動に柔軟性を持たせることができます。

寄稿者

Lindø Offshore Renewables Center (LORC)

所在地

デンマーク・Munkebo

洋上と陸上両方に理想的な試験場

ØsterildにあるDTUの試験センターは、世界最先端の洋上と陸上両方に対応した試験場です。海岸に近く、平坦な地形というユニークな立地条件で、地上100m地点の平均風速は、大型風車の試験に最小限必要な風速8m/sとなっています。このØsterild試験センターには、合計9つの試験台があり、そのうち5つの試験台では合計330m、残りの4つでは250mの高さの風車が設置されています。また、試験センターでは、一般の方にもその作業を見学していただくことができます。敷地内にあるユニークなビジターセンターでは、再生可能エネルギーと風力エネルギーの分野における学習と知識の共有を促進し、毎年4万人もの訪問者を迎えています。

寄稿者

DTU Wind Energy, Østerild試験センター

所在地

デンマーク・Østerild

可能性を追求する

DTU Risø キャンパスの風力エネルギー施設は、風車の様々な側面について設備容量や能力をテストする中心的な拠点になろうとしています。Poul la Cour（ポール・ラ・クール）風洞・大規模施設と呼ばれる国立の風洞により、DTU Risø キャンパスは、この分野で大学が所有・運営する大規模の施設の中でも上位に位置しています。大型風洞では、中型風車用のブレードを試験することができます。15m、25m、45mまでのブレードや、その他の細長い構造物の試験が可能な3つの試験台があり、静荷重や疲労試験などさまざまな試験を行うことができます。ポール・ラ・クール風洞は、さまざまな風条件下で風車のブレード性能を一貫して正確に試験することを可能にしています。

寄稿者

DTU Wind Energy, Risø Campus

所在地

デンマーク・Roskilde

拡大し続ける風車のブレードに対する試験設備

デンマーク・ブレード試験センター（Blaest）は、DNV、FORCE Technology、DTUが有数のブレード試験施設として知られています。風車ブレード試験分野における数十年の経験を生かし、ブレードの型式認証に必要なすべての構造試験を提供しています。非破壊(NDT)検査や試験ブレードの修理などの特別なサービスは、現地の協力パートナーを通じて提供されます。2020年、Blaestでは3つの試験装置を備えた5,000m^{2}の新しい試験ホールが稼働し、未来の巨大風車に合わせてスケールアップした約110mという驚異的な長さのブレード試験が可能になりました。

寄稿者

デンマーク・ブレードテストセンター（Blaest）

所在地

デンマーク・Aalborg

第13章

コストを下げる

風力発電産業では長年にわたり、コスト削減を基本方針としてきました。より賢く、より強く、より革新的な製品やソリューションを生み出すことで、風車の有効性を高め、風力エネルギーからの電力のコストを下げてきたのです。

デンマークには、世界有数の風車メーカーやサプライヤーが存在します。風力発電産業のあらゆる分野で活躍する合計約500社がデンマークに拠点を置き、世界的にもユニークなサプライチェーンと密接な能力・サービスのネットワークを構築しています。

しかし、デンマークの風力発電産業が際立っているのは、技術革新やコスト削減の能力だけでなく、バリューチェーン全体にわたる協力やパートナーシップを通じて、この産業独自の能力を発揮していることです。
風力発電産業では、長年にわたり、各社が協力し合い、必要な知識やノウハウを共有し、風力エネルギーのさらなるコスト削減を実現し、より優れたソリューションを生み出す強い伝統があります。

近くて、繋がっている
ユトランド半島の中だけでも、何百もの風力発電会社が互いに近接した場所に位置しています。柔軟でコスト効率の高いバリューチェーンにおける連携は、機密情報の共有、知識の共有、そして共に業界を前進させるための取り組みから成り立っています。

また、学術コミュニティ、公的機関、産業界の緊密な連携により、研究、技術革新、試験、実証の分野で大きな前進を遂げるための基盤が整っています。

パートナーシップとパッケージ
近年、風力発電産業では、製品の統合やバンドリングが盛んに行われています。

バンドリングは、デンマークのサプライヤーがチームを組んで、サービスや製品をパッケージ化していることを意味します。企業は、風車メーカーや発電事業者など、サプライチェーンの上流側企業に完全なシステムまたはパッケージ・ソリューションを提供することで、戦略的地位を強化することができます。そのためには、デンマークのバリューチェーン全体で、より緊密な協力関係を築く必要があります。

共通規格の導入
風力エネルギーの分野では、他の分野から多くの規格やベストプラクティスが採用されています。近年、デンマークでは風力産業における標準化の問題が大きく前進しており、企業やビジネス団体が集まって、風力発電産業での応用に特化した標準が形成されつつあります。共通の規格に準拠することで、サプライヤーは製造や品質管理の工程を減らすことができ、製品の不具合を減らすことができます。標準化は風力発電産業の多くの分野に適用することができ、標準の開発および導入は今後数年間で増加すると予想され、バリューチェーン全体での緊密な協力関係の重要性が強調されています。

デンマークの風力発電産業は、バリューチェーン全体でパートナーシップとコラボレーションを行うという長い伝統を持っています。メーカーはサプライヤーと力を合わせて製品や作業プロセスを最適化し、サプライヤーはパッケージ・ソリューションを提供するために協力関係を結成し、産業界と研究界は次の画期的な技術的進歩の基礎を形成するために協力をします。

「風力エネルギーは、40年足らずの間に、成熟した、信頼できる、費用対効果の高い技術に発展しました。すでに最も安価でクリーンな技術の一つとなった風力エネルギーですが、新しい革新的なアイデアが適用されれば、依然として価格は下がり続けるでしょう。」

JAN HYLLEBERG (CEO, WIND DENMARK)

写真提供：ステート・オブ・グリーン

デンマークのエネルギー・ソリューションについてさらに知りたい方、適用された世界中の事例を調べたい方、デンマークの専門家とつながりたい方は下記をご覧ください。

www.stateofgreen.com(英語版)
www.stateofgreen.jp (日本語版)

ステート・オブ・グリーン(STATE OF GREEN)は、非営利で、下記の公的機関と産業界による官民パートナーシップによって設立されました。

Confederation of Danish Industry

DANISH ENERGY ASSOCIATION

Danish Agriculture & Food Council

wind denmark

Ministry of Business and Growth Denmark

Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities

Ministry of Environment of Denmark

Ministry of Foreign Affairs of Denmark