

# 世界市場で注目される風力発電産業 (デンマーク)

コペンハーゲン事務所

デンマークの風力発電産業は、多数の農業機械メーカーが、米国カリフォルニアでの風力発電計画に応じるかたちで風力発電機の製造を開始し、80年代からビジネスとして本格化した。90年代後半にはデンマークの風力発電産業は急速に成長し、現在は風力発電の世界市場の約50%、スペインなどでの合弁事業も加えると約65%をデンマーク企業が占め、デンマークの有力産業となっている。本稿では、デンマークの風力発電産業について、関連産業を含む企業の動向や最近の大型洋上風力発電所の状況を含めて概説する。

## 1. デンマークの電力供給

### (1) エネルギー源の推移

デンマークで供給されている電力は、大型発電設備（発電のみを行う設備と、発電を主目的としたCHPプラント<sup>(注1)</sup>の両方がある）、それ以外の発電設備（小型のCHPプラント）、風力発電、および地域発電設備（民間・個人・団体等が運営）によって発電されている。2001年における発電総量は130PJで、このうち による発電量が最も大きく80PJ、 によるものは24PJ、 は16PJ、 による発電は10PJであった。

デンマーク政府はそのエネルギー政策として、石油・石炭を用いた発電から他のエネル

ギー源による発電への移行を進めている。これは、地域発電設備におけるエネルギー源を天然ガスへ移行するとともに、新たな代替エネルギーによる発電量の増加を図るものである。2001年の風力発電は総発電量の12.1%、バイオマス（わらなどを燃料とする）とバイオガスは約6%、廃棄物焼却は3.5%であった。

デンマークのエネルギー政策では、2003年までに新エネルギー（廃棄物焼却を含まない）による発電量を国内電力供給量の20%まで増加させる目標を掲げている。なお、2001年の新エネルギーによる発電量の比率は14.4%であった。

さらにデンマーク政府は、発電に伴って発

(注1) CHPは、combined heat and powerの省略形で、熱と電力の両方を供給（熱電併給）する。

生ずる多量の熱を有効利用するため、発電と地域暖房供給を合わせた熱エネルギー利用システムのCHPプラントを増加させることも、エネルギー政策上の目標としている。2001年の国内電力供給量の53%は、CHPプラントで発電されている(この比率は90年には約29%、80年には約19%)。同時にCHPプラントのエネルギー生産の効率化が進められており、石油を燃料とするCHPプラントの熱エネル

ギー生産効率は200%に達している。

1980～2001年の間に、デンマークの全発電施設の発電能力は、19.6%向上している。同期間に旧型の石炭燃料による火力発電所は閉鎖され、これに代わって新型のエネルギー効率の高い施設による発電が開始された。

デンマークの2大電力会社は、エルサム社(Elsam、ユトランド半島とフュン島向け発電)とエネルギーE2社(Energi E2、シェラン島ほ

表1 デンマークのエネルギー供給源(単位:PJ)

	90年	98年	99年	2000年
重油	255.4	495.0	641.9	764.5
天然ガス	120.2	291.8	296.1	286.7
廃棄物	15.2	26.8	29.5	30.8
チップ・廃材	15.2	15.5	15.4	13.5
わら	12.5	13.4	13.7	13.1
風力	2.2	10.1	10.9	16.0
他の代替エネルギー	0.7	1.5	1.5	1.5
合計*	421.4	854.2	1,009.1	1,126.0

\* 四捨五入による不突合含む  
出所：デンマーク統計局

表2 デンマークの供給源別電力供給量(単位:GWh)

	92年	98年	99年	2000年
大型発電施設	26,296	27,940	24,919	21,159
その他の発電施設発電所	1,567	8,188	9,066	8,826
風力	915	2,820	3,029	4,241
輸入	3,746	4,319	2,312	666
送配電ロス	490	291	373	450
合計*	32,035	34,338	34,331	34,444

\* 四捨五入による不突合含む  
出所：デンマーク統計局

表3 デンマークの発電施設数の推移

	92年	98年	99年	2000年
大型発電施設	19	18	17	17
その他の発電施設* <sup>1</sup>	163	571	576	571
風力発電機	3,442	5,208	5,620	6,270
水力発電所	52	44	40	37
その他* <sup>2</sup>	30	87	116	118

\* 1 バイオガス施設を含む

\* 2 事業用発電施設

出所：デンマークエネルギー関連企業組合

か向け発電)である。両社は全国133の送電会社(送電組合を含む)によって所有されている。送電会社の多くは自治体や消費者の共同出資組合が設立したもので、送電網と変換機の運営、整備、拡張などを行っている。エルサムとエネルギー E2は全国の電力変換企業14社、2つの送電システム管理企業、および消費者との送電契約を行う50の送電契約会社を所有している。

2つの送電システム管理企業とは、エルトラ(ストアベルト海峡以西)とエルクラフト・システム(ストアベルト海峡以東)で、それぞれが地域の送電網の安定性を監視し、電力市場の活性化を図っている。また、送電の安全性を保ち、環境に配慮した発電と送電を担う。

## (2) 近隣諸国との電力輸出入

デンマークはノルウェー、スウェーデンおよびドイツなど近隣諸国との間で電力取引を行っている。2001年の輸出入の収支は約2PJの輸出超となっており、これはデンマークの総発電量の1.6%に相当する。

2001年の輸入量は約3PJで、これはスウェーデンから供給されたものである。同年の輸出量は約5PJで、ノルウェーとドイツに輸出された。ドイツへの輸出はデンマーク国内の

エンステズ(Ensted)にある発電施設の一部をドイツの企業が所有しており、ここから供給されたものである。

## (3) EU電力市場の自由化

EU諸国は、2004年までに事業所向けの、2005年までに家庭向けの電力・ガスの供給を自由化することになっている。デンマークも関連企業の民営化と市場競争力の強化を進めている。この民営化を通じて、デンマーク政府は事業所および家庭が購入するエネルギー(電力・ガス)の供給企業の選択枠を広げる、(他のEU諸国の企業に対して)デンマーク企業のエネルギー価格の競争力を向上させる、環境改善・保全を図る場合には経済効率の最良な方法で行う、という目標を掲げている。

デンマークでは、上記の電力市場の自由化について、電力供給に携わる各企業の再編と民営化が実施され、2003年1月1日からは、電力購入先の自由化が全消費者に対して実施されている。

政府は、電力購入先の自由化によって、企業間の自由競争を通じた電力価格の低下とエネルギー供給の効率化、多様化が得られると期待している。また、現政府は市場競争の激化が経済効率の促進につながるとみている。

しかし、現在のところ、電力購入先の自由化は実質的には一部に限られている。デンマークでは、環境に負荷の少ない新エネルギーやCHPプラントによる発電の開発費補助が、消費者の支払う電気料金に含まれている。また、現在は（法律で発電の業務を定められた）大型発電設備以外の発電設備と風力発電による電力の購入を、送電会社に対し義務付け、このような環境に優しい電力を優先して消費することにしている。この優先消費では、環境に優しい電力の全発電量を消費者の地元の送電契約会社が毎年完売することとなっている。環境に優しい電力の発電量は気候等により左右されるものの、消費者が購入する電力の40%程度を占めている。残りの60%に関しては、2003年1月1日から、消費者は自分の選択した電力販売会社より購入することが可能になっている。

しかし、政府はこれをさらに変更する方針で、消費者が購入する電力の発電方法選択の自由化も検討している。これによって、新エネルギーに関するEU指令の条件に基づき、新エネルギーによる発電であることを示すラベルの導入を促進させたいというのが、政府の意向である。

(4) 新エネルギー政策と新エネルギーの普及  
72～79年のオイルショックを経て、デンマークのエネルギー政策ではエネルギーの確保が、中心的課題だった。発電所の多くでは燃料を石油から石炭へと変換し、さらに小規模の発電施設および地域暖房システムは、熱電併給の可能なCHPプラントに改築することを奨励した。また、エネルギー供給源は北海油田の開拓により確実になり、現在デンマークにおける石油とガスの供給量は、国内需要量を超えている。しかし、石炭燃料による発電は地球温室化効果ガスを大量に発生するため、80年代には、この抑制が考慮されるようになった。オイルショック以降のデンマーク

のエネルギー政策は、国内の環境破壊、さらには地球規模の地球温室化効果への対策を考慮するようになった。

しかし、2001年11月に発足した新政権は、環境への配慮よりも産業と経済の発展を重視しており、新エネルギーを含めたエネルギー政策も市場における自由競争に則った経済効率を優先するものへと若干変化がみられる。

新政権のエネルギー政策において、新エネルギーの開発は地球温室化効果ガスの発生を抑制するという目標達成のために重要視されている。デンマークは大気の温暖化を促進する物質の排出量を削減し、2008～2012年の間に99年のレベルまで戻すことになっている。デンマークの二酸化炭素総排出量の約40%（2000年値）は発電における排出であり、地球温室化効果ガス削減の目標を達成するためには、発電産業における環境配慮への働きかけが重要になっている。具体的には、新エネルギーによる発電の増加と電力消費の削減が図られている。デンマークでは88～2005年に二酸化炭素排出量を88年のレベルから22%削減することを目標にしていたが、目標値の3分の1以上は石炭燃料による火力発電を風力発電によって補うことで既に達成している。

政府は特に風力発電のほか、大型発電設備以外の発電設備による発電効率の向上にも注目している。この種の小型発電設備で発電されている電力は、デンマークの消費電力の約25%を供給している。多くの設備は20年以上前に建設され、天然ガスを燃料にしている。また、地方の小さな自治体が独自にこのような発電設備を所有している場合がある。これらは発電システムのない地域の暖房供給施設として建設されたもので、現在でも時に応じて発電システムを停止することがある。

2002年9月に政府が発表した「エネルギー市場の自由化」計画によると、政府は2003年末までにこの種の発電設備の操業における

効率と環境への配慮を向上させる、環境に優しい電力（CHPプラントまたは風力等の新エネルギーによる電力）の購入義務付けを廃止し、これらの発電設備からの電力を自由競争市場で販売する、これらの発電設備は熱電供給が可能なため、地域暖房料金の上昇あるいは国家予算への負担を増加させることなく、これら設備からの電力料金を引き下げ、という意向を示している。また、この種の発電設備の民営化も計画されている。

80年代半ばから風力発電の普及が進む中で、デンマーク政府は風力発電による電力供給量が消費電力に占める割合の目標値を当初の「2005年までに10%」から「2003年までに16%」に引き上げた。実際には、2003年までに全消費電力の23%まで達成可能である。96年に発表された「エネルギー21」では目標はさらに高く、長期的な目標値として2030年までに全消費電力の40～50%達成を目指していた。現政府のエネルギー政策の目標値は、2003年までに全消費電力の20%を風力発電によって供給するとしている。

政府の目標達成のため、洋上風力発電施設の建設が90年代を通じて計画された。91年にはビネビュ（Vindeby）、96年にはチュヌ・クノブ（Tunø knob）に試験的に小規模な風力発電施設が建設された。2000年にはコペンハーゲン沖のミデルゴロンヌン（Middelgrundten）に、デンマーク初の大規模な洋上風力発電施設（40MW）が建設された。さらに、この約4倍の規模である160MWの風力発電施設が北海のホーンズレウ（Horns Rev）に2002年に完成し、バルト海のロドサン（Rødsand）にも同規模のものが2003年内に完成する予定である。これらの大規模洋上風力発電施設は電力会社のエルサムとエネルギーE2が、環境・エネルギー省からの発注を受けて建設したものである。

デンマークでは風力発電によって電力を供

給すると、発電量1kWh当たりで定められた金額に市場価格を加えたものが、風力発電に対する補助として還元される。現在の政府は、1kWh当たりの還元額を引き下げ、（電力の消費料金にかかる二酸化炭素税に相当する）1kWh当たり0.10デンマーク・クローネ（以下、クローネ）を市場価格に加えたものを風力発電への還元額として定めている。また、洋上風力発電施設に対しては、特別に市場価格に1kWh当たり0.36クローネを加えた還元額となっている。

風力のほか、バイオマスも新エネルギーとして利用されているが、これは経費が高いため、かなり小規模なものに限られている。

## 2. デンマーク風力発電の歴史

### (1) 風力発電の始まり

デンマークの風車利用は数世紀にわたる歴史がある。全国各地の小高い丘の上には、キャンバス地の帆を張ったオランダ型の風車が建てられ、風力によって小麦をひいて小麦粉を作っていた。19世紀後半から20世紀初頭にかけて、多数の木の板で風を受ける「ウインドローズ」と呼ばれる風車が米国に登場した。デンマークでは風の強さに応じて細い木の板でできた羽根の着脱可能な風車が利用され、これは「クラブサイラー（板の帆）」と呼ばれていた。「ウインドローズ」と「クラブサイラー」は農耕具を動かしたり、小麦をひいたり、鉄の車輪を磨くための動力を供給するほか、乾燥期に貯水槽の水を供給するポンプの動力源となっていた。1931年にはこうした風車がデンマーク全国に約3万台あったという記録が残っている。

発電用の風車には、気象学者であり起業家、そしてフォルケボイスコーレ（成人教育を行う教育機関）の教師であったポール・ラクール氏（Poul la Cour：1846～1908年）が、1889年から研究に取り組んだ。彼は幾つもの

.....

風車と異なる形状の羽根を考案し、1897年に彼が勤めるアスコウ・フォルケホイスコーレに試験的に風力発電機を建造し、これがデンマーク初の風力発電機となった。

ラクール氏に先立って、米国人のチャールズ・F・ブラッシュ氏 (Charles F. Brush : 1849~1929年) が1887~88年に米国で世界最初の自動運転式の発電用風車を造っている。ブラッシュ氏は公共の電気装置に利用される効率の良い直流式ダイナモを設計し、これは世界初の商業用電光や酸化鉛バッテリーの製造に用いられた。ブラッシュ氏が設立したブラッシュエレクトリック (Brush Electric) 社が、1892年にエジソン・ジェネラル・エレクトリック社 (Edison General Electric Company) に吸収され、名称を変更してジェネラルエレクトリック社 (General Electric Company) となった。

ブラッシュ氏の風力発電機は「ウインドローズ」タイプのローターの直径が17メートルという巨大なもので、144枚の回転羽根はスギで作られていた。この風力発電機は20年間稼働し、電力はブラッシュ氏の自宅の地下室に設置されたバッテリーに蓄電されていた。しかし、巨大なローターがゆっくり回転する米国式風力発電機の発電効率はさほどでなく、この風車1台の発電能力は12kWに過ぎなかった。

後にデンマーク人のラクール氏が開発した、羽根の枚数が少なく、回転の速い風力発電機は発電効率のより優れたものであった。ラクール氏は羽根の形状の研究を重ね、自身の風洞実験装置 (風の流れを調べるトンネル装置で、航空機や車両、高層ビル設計時に利用される) を開発していた。彼はエアロダイナミクス研究の基本に基づいて風車および羽根の設計に取り組み、また、風力発電機の出力を安定化させる機械装置の特許も取得した。こうした彼の研究は風力発電機設計に大きな進歩をもたらした。

彼はエネルギーの蓄えを重視し、風力発電からの電力はアスコウ・フォルケホイスコーレのガス灯のための水素生産に利用していた。この風力発電機は古典的な風車を直流電気発電に用いたもので、2基が1897年に同校に建造された。ラクール氏は同校で風力発電技術者 (Wind electricians) のためのコースを開いていた。また、1905年には風力発電技術者協会を設立、既に1年後には356人の会員が参加していた。

また1918年には、デンマークの全国120カ所に風力発電機が建造され、各20~30kWの発電機の総発電能力は3MWに至っていた。これは、当時のデンマーク全体の消費電力総量の3%強の供給に相当する。

ラクール氏の生徒達も2~3枚羽根の風力発電機を開発し、これらが現在のデンマークタイプの風力発電機のモデルになった。第二次世界大戦中には、技術会社のF.L.シュミット (F. L. Schmidt) が2~3枚羽根の風力発電機を多数建造した。1942年に同社がボウ (Bogø) 島に建てた風力発電機は、一部に風力とディーゼルエンジンを組み合わせたシステムを導入し、島の電力供給に利用されていた。この3枚羽の風力発電機が1950年代の風力研究において重要な役割を果たした。

大戦後、デンマークに石炭と石油が大量に輸入されるようになると、風力発電への関心は低くなっていった。しかし、発電会社のチーフエンジニアであったヨハネス・ユール (Johannes Juul) 氏は1950年初頭に、かつて1903年にラクール氏のコースで学んだ風力発電に再度取り組み始めた。ユール氏は数々の実験機を造り、交流発電機用の風力発電機開発に成功した。1956年、ユール氏の風力発電機が国家の補助を受け、電力評議会によってファルスター島南部のゲサー (Gedser) に建造された。そして、これが現代の風力発電機のモデルとなった。

直径24mのローターが高さ24mの柱に取り

付けられた発電能力200kWのGedser機は、年間に40万kWhを発電し、これは以後長年、世界最大の風力発電機であった。Gedser機にはタービンの回転速度が許容量を超えると自動的に羽の回転が停止する装置が備えられていた。同機は耐久性に優れ、11年間無修理で運転し続けた。現在の3枚羽根の直立型風力発電機は、基本的にこのGedser機と同じシステムに則って設計されている。当時の人々の関心は環境よりも経済性にあり、コストが石油による発電の2倍にもなる風力発電の試験運転は11年間で終了した。

しかし1975年、Gedser機は米国の風力発電計画が調査機として注目し、NASAの指名を受けて改修されることになった。3年の調査用運転期間には、修理をすることなく運転し続けた。この時使用した発電機の主軸とローターは、デンマークのビャーリンブロー（Bjerringbro）にある電力博物館に展示されているほか、Gedser機は風力発電開発の記念として、同機自体が博物館となった。

## （2）世界に広がる風力発電

デンマークの風力発電開発への関心は、73年の石油危機を機会に著しく高まった。70年代に開発された風力発電機は、基本的にはGedser機の小型化であった。これら個人のアマチュア技術開発者によって設計された風力発電機の最大出力は10～15kWに過ぎなかった。

そのうちの一人、クリスチャン・リースエア氏（Christian Riisager）は自宅の裏庭で、Gedser機の設計を基本にして、グラスファイバーを羽根に用いた高さ12m、出力22kWの風力発電機を開発した。発電機として電気モーターを利用するほか、車両のギアやブレーキに一般の機械部品を用いて風力発電機の研究を重ねた。1号機作成に成功すると、同機の発電する電力を地元の電力供給会社の供給網へ送電する承認を得た。同氏は夫人とともに

に発電機の販売会社を興し、78年には同氏の発電機はデンマーク全国で30基、家庭用発電機として建設されていた。同氏の成功で企業の関心も高まり、80年代には企業による風力発電開発が始まった。

80年代には、多くの革新的な小型風力発電機が登場した。また国民の原子力発電所建設への強い反対もあり、政府も風力発電機の新開発に関心を示し始めた。85年にデンマーク議会は原子力発電を導入しない決定を行い、代替エネルギーとして、風力発電の導入を決定した。また、電力会社と協力し100MWの風力発電機を導入する計画を打ち立てた。政府は風力発電機の機能と安全性、仕様などの保証制度を導入した。この保証のための検査は、もとは原子力研究を目的に設立された国立の研究機関（Risø National Laboratory）に委託された。現在、同研究所での原子力研究は行われていないが、エアロダイナミクスや気象学、風力評価、構造力学、先端素材などの分野を専門とする約100人の研究者がいる風力研究部門は、同研究所の最も重要な機関となっている。

デンマークの電力会社は風力発電の開発初期から、風力発電に関心を抱いていた。Gedserの風力発電機は電力会社SEASが資金を提供し、建設したものである。80年代前半には、電力会社は大型風力発電機の開発を始め、630kWの試験機を2基建設した。しかし、電力会社がこれら大型風力発電機による発電コストは高すぎると判断し、実用には至らなかった。

しかし、実用機製造者も大型の風力発電機開発を進め、後に、1MWあるいは2MWの発電機が設計された。80年代に風力発電機製造を始めた企業は、もとは農業機械製造会社であった企業が多い。ベスタス（Vestas）、ノータンク（Nordtank）、ボーナス（Bonus）、ノーデックス（Nordex）、NEG ミコン（NEG

.....

Micon)など、農業機械製造会社は風力発電機分野が発展する可能性にいち早く注目していた。これら企業は、自社の機械製造にかかわる知識を活かして成長し、まずはデンマークの風力発電機市場を占め、やがて世界の風力発電機市場のランキング上位を占めるようになった。

デンマークの風力発電機製造業成長の背景には、80年代の米国カリフォルニア州における風力発電開発計画がある。当時、デンマークの風力発電機は既に大型機の開発に着手し、設計と改善を繰り返していた。これらのうちには、ボーナス社のBonus 30kW(80年開発)やNEG ミコン社のNordtank 55kW(80~81年)がある。NEG ミコン社のNordtank 55 kWだけでも、1,000基以上がカリフォルニアの巨大なウインドファームに建設されている。こうして、カリフォルニア市場の著しい拡大とともにデンマークの風力発電機製造企業も大きく成長した。しかし、これら企業の成長はカリフォルニア市場に依存しており、85~86年にカリフォルニア州の風力発電計画が終了すると、他の数少ない小規模な市場へ製品を供給するだけになり、20数社あった風力発電機製造企業のうち、ほとんどが倒産に追い込まれた。同時に、米国にあった風力発電機の製造工場はすべて閉鎖された。

市場競争を経て残った企業は、その後慎重に海外市場開拓を試み、現在、デンマークの風力発電機製造企業は世界40カ国へ風力発電機を供給している。ドイツ、スペイン、米国、イタリアが輸出先の上位を占めている。

### (3) 今日の風力発電機

風力発電機は過去20年間に大型化が著しく進んだ。初期の風力発電機は回転部の直径10.6m、発電能力は25kWであったが、今日では一般的に回転部の直径48~54m、発電能力

は750~1,300kWとなり、20年前に比べはるかに巨大なものである。これらの発電機は主に洋上発電に利用されている。

91年にはロラン島の沖、バルト海上にボーナス社の450kW発電機11基が建設された(ピネビュ・ウインドファーム)。ここで建設された発電機は、高電圧変換機のための空間が、従来の風力発電機よりも高い位置に設けられている。国立リス研究所は、このウインドファームで洋上における風の状況や風の発生などを調査し、その結果を洋上風力発電の研究に活かしている。同研究所の調査によって、洋上では陸上よりも発電量が20%向上することが明らかになった。

95年にはカッテガットのチュヌクノブ沖に、送電会社によってベスタス社の500kW機10基のウインドファームが建設された。この発電機は洋上発電に適するように改良され、発電機のギアボックスは陸上用に比べ10%速い回転に適應するものに変更された。これにより発電量は陸上に比べ5%増となった。

97年にはコペンハーゲンの郊外5kmのアベウアホルム(Avedore Holme)の火力発電所が面した海岸に、300kWの風力発電機12基と1,000kWの試験機1基が、発電会社によって建設された。

洋上発電の調査結果が好ましく、デンマークで大規模な洋上風力発電が期待されるようになる、各風力発電機製造企業はさらに大型のメガワット機の開発を進めた。

95年にNEG ミコン社が開発したNordtank 1500kWは、回転部の直径60mで、750kWの発電機2基が平行運転する(現在のモデルでは2基の750kW発電機と1,500kW発電機を搭載)。また、ベスタス社は1,650kWおよび300kWの2基の発電機を搭載したVestas 1.5MWを96年に開発している。この回転部の直径は68mである。現在みられる風力発電機のうち最大のもは、回転部の直径が80mで発電能力は2,500kWである。2,000kWの風力

発電機 1 基で、旧型の200kWの発電機1,980基分よりも多くの電力を発電可能だ。

これら巨大なメガワット機は98年頃から洋上発電用として登場した。コペンハーゲン沖のミデルゴロンヌンにはポーナス社の2MW機が20基建設された。NEG ミコン社およびポーナス社の2 MW発電機（それぞれ99年、98年開発）では、従来の風力発電機の安全性をさらに向上し、出力抑制に伴う回転停止機能が搭載されている。また、回転部の直径が80mにもおよぶノーデックス社の2.5MW発電機（2000年）にも、出力抑制のための固定システムが取り入れられている。

技術の発達に伴う風力発電機の大型化は、さらに風力発電機の発電経費の節減にも大きく貢献している。今日の風力発電にかかる発電量 1 kWh当たりの費用は、石炭や原子力による発電と拮抗している。海岸線が長く、海風が強く吹き付ける英国やデンマークは風力発電に適しており、大型のウインドファームでの発電量 1 kWh当たりの費用は約 4 米セントである。風力発電機の耐用年数は20年で、運転とメンテナンスにかかる費用は風力発電機の製造費の約 3 % である。

大型の風力発電機による洋上発電では安定した発電量を得られるほか、発電効率も高いため、デンマークでは将来の風力発電において、洋上風力発電に大きな期待を抱いている。4,000MWを超える洋上風力発電によって、デンマーク全国の電力消費の40%を供給するという目標を達成しようというものである。

#### (4) 個人所有と共同所有が主

78年5月、風力発電の振興を目的に、デンマーク風力発電機所有者協会（Danske Vindkraftværker）が設立された。同協会の活動は、風力発電所有者と送電会社、所管官庁、発電機製造業者などとの関係づくり、および、風力発電の可能性についての情報の管理などである。

当時、送電会社や政府は風力発電による電力供給に関心を示しておらず、風力発電所有者にとって電力を売ることは難しい状況にあり、その改善が協会に期待されていた。また、一般市民の風力発電への関心を高めるために、「自然エネルギー（Naturlig Energi）」という雑誌を発行するほか、新聞などメディアを通じて、風力発電についての紹介を行うなども、当初の重要な活動であった。

80年には多くの人々が資金を負担して風力発電機を共同で所有する、風力発電共同出資組合がグトランド半島のニュソルベア（Ny Solbjerg）に誕生した。風力発電機の共同所有は農業共同組合の考えを基本にしている。新エネルギーの発展、より良い環境づくりの促進、協力の精神によって問題を解決するという目標に同意を示した人々が集まって設立された風力発電共同出資組合は、その後、全国に次々と現れた。

2002年の調査では、デンマーク全国にある約6,300の風力発電機のうち、80%以上が共同所有あるいは農家による個人所有で、残り20%弱が電力関連企業による所有である。また、全国の15万世帯が風力発電機あるいは共同出資の株を所有しており、デンマーク人の風力発電機への関心の高さを表している。

#### (5) 風力発電機産業の規模

風力発電機の世界市場における2001年の総売上高約60億ユーロのうち、デンマークの風力発電機製造企業の総売上高は約30億ユーロ（200～220億クローネ）に達している。90年代後半の5年間に世界の風力発電機産業は毎年40%以上の成長ぶりを示し、21世紀初頭と同産業の成長は約20%と期待されている。

2001年にデンマークの風力発電機製造企業が供給した風力発電機の総発電能力は、3,452MWに及び、これは前年比60%増であった。これは、同年に世界各国で建設された新規原子力発電機の総発電能力1,700MWの2倍

.....

に相当する発電能力分の風力発電機が、デンマークの企業から供給されたことになる。

デンマークの企業が製造・販売する風力発電機の発電能力の平均値は、2000年の1基当たり861kWから2001年には944kWへと拡大した。平均的な1MWの風力発電機の回転部直径は50～55mである。現在販売されている風力発電機は750kW～1.3MWの比較的小さな陸上用と、マルチ・メガワットの洋上用（陸上での使用も可能）に大別される。

2001年の国内の風力発電機販売量は、輸出の大幅な伸びと対比的に、93年以降初めて前年比減となり、95年以前レベルの117MWにとどまった（2000年の販売量は566MW）。これは99年に、消費者が購買する電力の発電方法を自ら選択できるという「グリーン証書」制度が、国会で検討され始めたことにより、個人による風力発電建設が99年に集中したことによる。さらに、2000年末には従来の補助制度が廃止され、風力発電への補助額が大幅に引き下げられたことも、2001年の売り上げ減の理由の一つである。

### 3. デンマークの風力発電の現状と今後の見通し

#### (1) 風力発電による電力供給の増加

デンマークでは、80年代半ばから、2005年までに国内消費電力の10%を風力発電で供給するという目標に向かい、努力が続けられてきた。これは、1,500MW程度の発電能力を持つ風力発電機を全国に設置することで達成できると考えられ、政府は目標達成のために、2000年までに400MWに相当する風力発電機の設置を送電会社に指示することになっていた。85年と90年にはそれぞれ100MW相当の風力発電機設置が、さらに96年には200MW相当の設置が指示された。

また、96年発表のエネルギー政策「エネルギー21 (Energi 21)」の中では、2030年まで

に消費電力の約50%を風力発電によって供給する目標を記しており、これは、主に洋上風力発電によって達成されると考えられていた。政府は98年には750MW相当の洋上風力発電建設を指示している。

#### (2) 風力発電機への規制と補助

エネルギー政策上の目標を達成するために、政府はさまざまな規制と国内企業支援策を導入した。

電力会社は、その地域に個人が設置した風力発電機の発電する電力の85%を（年間に2万kWhの電力を消費する家庭の支払う電力料金の料金基準に従い）買い取ることを義務付けられている。これは1kWh当たり平均0.25～0.35クローネである。

デンマークの各世帯、事務所、工場などの支払う電力料金には、税金が含まれている。これは、電力料金を上げることで全国の電力消費量を減らし、石炭や石油燃料により火力発電所から出る大気汚染物質を削減する目的による。しかし、新エネルギーによって発電すると1kWh当たり0.10クローネの二酸化炭素税が還元される。これは、発電所あるいはその他企業や家庭の所有するすべての新エネルギー発電機による発電に適用されている。

この風力発電機による電力を供給すると二酸化炭素税が還元されるという、新しい税制が導入されて以来、電力会社は個人所有の風力発電機から電力を買い取るよりも、自社で風力発電機を所有し電力供給した方が経費を大幅に削減できることとなった。例えば、電力会社の所有する風力発電機の発電経費は1kWh当たり平均0.28～0.34クローネで、1kWh当たり0.10クローネの二酸化炭素税還元を受けると、発電経費は差し引き1kWh当たり0.18～0.24クローネとなり、個人所有の風力発電機から買電した場合の0.30～0.37クローネと比較すると、はるかに安価になる。

電力会社のほか、一般企業や共同体などが

風力発電機を所有して電力を供給しても、電力にかかる税が還元される。政府は電力供給により利潤を得る電力会社と、他の一般企業や共同体など、電力供給により利益を得ない供給者に対して、それぞれに応じた還元率を設けている。電力会社に対しては1 kWh当たり0.17クローネ、一方、他の風力発電機所有者に対する還元額は1 kWh当たり0.5～0.62クローネになっている。

95年に定められた風力発電機の送電網に関する特令において、送電会社は市（各市は風力発電機の設置可能地域を指定する）が定めた1.5MWの風力発電適用地域内に送電網を建設することが義務付けられている。また、送電会社は個人の所有する風力発電機を地域の11～20kVの送電網へ連結することを許可しなければならない。この場合には、風力発電機所有者が送電網延長の工事費を負担する。しかし、送電網の延長が不可欠の場合には、発電会社はその工事費を負担することになっている。

風力発電機所有者は11kVの送電網に風力発電機を連結するための変圧器の費用および電力メーターの貸借料を負担することになっている。

風力発電機は税制上、産業用機械と同様にみなされており、年間30%以内の減価償却が認められている。しかし、風力発電機所有者の電力販売による収入が年間3,000クローネを超える場合で、減価償却あるいは他の経費控除を選択しないときには、電力販売による年間収入のうち3,000クローネを超える部分のみに対し一律で60%課税される。これは、所有する株の少ない風力発電機の共同所有者にとり、簡単で有利な税制となっている。

全国の送電網に関する規則によって、電力会社以外が所有する風力発電機の所有には限

度枠が定められている。風力発電機の共同所有に対しては、共同所有者組合の所在する自治体が限度枠を定めている。この規則は、風力発電機共同所有者組合の組合員1人当たりの所有株式限度を、年間発電量に換算して3万kWh以内と定めている。これは1人当たりの投資総額に換算すると12万クローネに相当する。さらに、個人が所有する風力発電機は、当該者の居住する敷地内に1基とされている。こうした規制は政府の風力発電支援策の乱用を防ぐために設けられている。

### (3) 風力発電による供給割合は増加

デンマーク国内に設置された風力発電機の数には2001年には既に6,445基に達し、その発電能力総量は2,556MWに上っている。これら風力発電機による発電量はデンマーク全国全消費電力の約13%を占めており、2003年の目標値は20%となっている。

実際には、風力発電による電力供給は2003年までに全国の消費電力の23%を達成することが可能である。96年に発表された前出の「エネルギー21」では長期的な目標値として、2030年までに全消費電力の40～50%達成が見込まれていた。

### (4) 大型洋上風力発電所の設置状況

2002年末、北海のユトランド半島ホーンズレウ沖に、発電能力160MWで世界最大の洋上ウインドファームが完成し、2003年初めから商用運転を開始した。また現在、バルト海のロドサン沖に158MWのウインドファームを建設中で、2003年中に完成予定である。こうした大規模な風力発電所の建設は、デンマークのエネルギー政策である「エネルギー21」中に掲げられた、2030年までに全国の消費電力の約50%を風力発電によって供給するという目標達成のためであった。

現在の政府は、この目標を緩和し、風力発電のほか、地域電力供給に限られたCHPプラ

.....

ントからの電力、スウェーデンの水力発電などの代替エネルギーによる電力供給を消費電力の50%とすることを目標にしている。しかしながら、発電コストを抑え二酸化炭素放出量を抑制するために効果的な風力発電には、政府も関心を示している。

現在、北欧における風力発電は、風力発電機設置のための土地不足により、洋上へと移行している。また、洋上では陸上よりも強い風が得られ、発電効率が向上することも理由の一つである。前出のように近年の調査では、洋上では陸上よりも風が強いだけでなく、風速が安定しているほか、風の渦や風の切れ目が少なく、発電が安定化することが明らかになっている。こうした条件により、風力発電機の耐用年数が長くなり、発電コストの低下を図ることができる。

洋上風力発電における発電コストを考慮した場合、2 MW以上の大型風力発電機による総発電能力が100MW以上のウインドファームが理想とされている。洋上風力発電では、海底に基礎部分を設置するために多大な建設費が必要であるが、発電効率の高い大型の風力発電機を利用して発電コストを抑えることができる。

今後30年間に、デンマークの海上に全体で4,000MW以上の発電能力に相当する風力発電機が建設されると期待されている。洋上風力発電機の建設は既に90年代に始められ、91年には、従来の陸上用の風力発電機11基による、発電能力総量4.5MWのピネビュ・ウインドファームが、ロラン島のピネビュ沖に建設された。95年にはカッテガットのチュヌ・クノブ沖に一部改良を加えた風力発電機10基による総5 MWのウインドファームが建設された。

これら初期の小型機による洋上発電は発電コストが割高であったが、パイロットプロジェクトとしてさまざまな調査の対象となった。これら洋上発電の調査結果は好ましいも

のであったため、大規模な洋上風力発電が期待されるようになり、各風力発電機製造企業は大型のメガワット機の開発を進めた。

2000年にはコペンハーゲン沖のミデルゴロンヌンに、2 MW機20基による計40MWのウインドファームが建設された。ここでは、風力発電機の基礎部分が建設会社によって開発され、施工されている。この技術はさらに、2002年に建設された北海のホーンスレウの160MWにおよぶウインドファームや、2003年バルト海のロドサンに建設中の158MWのウインドファームにおいても、洋上風力発電機設置のために応用されている。

これら大型ウインドファームは経済的な観点から、風力発電の将来を担うものとして注目されている。例えば、ホーンスレウ・ウインドファームでは、160MWの総発電出力の80基の風力発電機から年間に供給される1億6,000万kWhの電力は、13万3,000戸の電力消費量あるいはデンマーク全国の冷蔵庫の電力消費量を賄うことが可能である。

#### (5) 輸出状況と世界市場シェア

デンマークの風力発電機産業の総売上高は、2000年の130億クローネから2001年には200億クローネに伸びている。このうち、195億クローネは輸出市場における販売額である。さらに、10～20億クローネの風力発電機用部品がデンマークから輸出されている。

デンマークの風力発電機の販売は2001年に3,452MW（海外の販売支社分を含む）で、過去最高に達した。前年比では60%増で、これは米国市場の受注が急増したことが主な理由である。この反動で2002年の販売量は約10%落ち込んだが、過去5年間では風力発電機販売量は37%増加している。

2001年にはデンマークの風力発電機は世界市場の50%を占めるに至った。デンマーク、スペインおよびインド企業の共同出資による

ベンチャー企業が販売した約664MWを加えると、デンマーク企業の販売総量は4,116MWとなり、これは世界市場の65%に相当する。

2001年のデンマークの風力発電機の輸出先を見ると、ドイツと米国が最大の市場で、輸出の65%を占めている。ドイツへの輸出は2000年の710MWから2001年には約70%増加し、1,200MWであった。米国への輸出は2000年の105MWから900%増加し、1,037MWとなった。米国への輸出の急増は同国のPTC (Production Tax Credit) の期間終了前に、優遇を受けて風力発電機を設置しようとする受注が殺到したためである。他の主要な輸出先は、スペイン (255MW)、イタリア (162MW)、日本 (142MW) となっている。

デンマークの風力発電機会社が販売する風力発電機の発電能力は、2000年には平均で861kWであったのが、2001年には944kWと大型化している。1MWの風力発電機の回転部の直径は50~55mである。

現在の風力発電機市場における発電機の発電能力は750kW~1.3MWで、比較的小型の陸上用と、マルチメガワットの洋上用に2分化している。

## 4. 風力発電関連企業・研究機関

### (1) 風力発電機メーカー

デンマークには風力発電機メーカーが7社あり、製造、設置、保守およびサービスなどに全国で約1万6,000人が就労し、輸出用の部品供給や設置を担当する部門には約8,000人が就労している。

風力発電機メーカー7社のうち、ボーナス社、NEG ミコン社、ノーデックス社、ベスタス社、ウィンコン・ウェスト・ウィンド (Wincon West Wind) 社はメガワット級の大型風力発電機を供給している一方で、ゲンビント・エンジニアリング (Genvind Engineering ApS) 社は2~22kWの小型機を、

ウィンドミッション (Windmission) 社はさらに小型の600W~4kWで羽根の多いフラワータイプの家庭用風力発電機を製造している。

ボーナス・エナジー社 (Bonus Energy A/S)  
www.bonus.dk

ボーナス社は、79年に初めて風力発電機を開発してから約20年間に4,500台以上の風力発電機を世界各国に供給している。同社の前身は灌漑設備メーカーのダンライン社 (Danregn A/S) で、80年に5kWの風力発電機を開発、次いで開発された22kWの発電機はデンマーク全国に15基が建設された。82~87年には米国のウインドファームに65kWの風力発電機を供給するなど、ダンライン社の風力発電機部門が大きく成長し、社名をボーナスへと変更した。90~91年に世界初の洋上ウインドファームとして建設されたデンマークのビネビュのウインドファームへ400kWの風力発電機を11基供給した。

97年には初の1MW風力発電機開発に成功し、現在、ボーナス社の工場では、600kW、1MW、1.3MW、2MWの風力発電機が製造されているほか、2003年には大型の2.3MWの製造が始まっている。世界初の北極圏における風力発電や世界初の洋上風力発電に同社は製品を供給したほか、コペンハーゲン沖の洋上風力発電や2001年に建設されたテキサスの世界最大のウインドファームへも風力発電機を供給している。さらに2003年に建設中のニュステズ (Nysted) 洋上ウインドファームへは2.3MWの風力発電機を供給している。

ボーナス社は世界19ヵ国へ風力発電機を供給しており、その年間販売量は600MWを超えている。日本へは99年に1MW機20基を北海道のウインドファームに供給したほか、2001年には青森県「岩谷ウインドファーム」へ1.3MW機25基を供給している。同社の風力発電機供給数は日本全国で53に達している。

.....

NEG ミコン社 (NEG Micon A/S)

www.neg-micon.dk

80年代に風力発電機開発によって成長したノータンク (Nordtank) など複数の農業機械製造企業の合併によって、現在のNEGミコン社が90年代に作られた。95～99年にNEGミコン社は急成長し、世界16カ国に600kWおよび700kWの風力発電機を1,250基供給した。

現在、同社の製造する風力発電機は回転部の直径が44～92mで、これらの発電能力は750～2,750kWに達している。2003年の総売上高は62億5,230万クローネであった。

NEGミコン社は東京に支社を設け、日本全国に風力発電機を供給している。

ノーデックス社 (Nordex AG)

www.nordex-online.com

ノーデックス社は85年にデンマークの風力発電機製造企業として設立された。90年代を通して、ドイツ企業の持ち株が増え、現在のノーデックス社は本社をドイツのハンブルク近郊に設けている。傘下のノーデクスエナジー (Nordex Energy) 社とズードピントエナジー (Sudwind Energy) 社はそれぞれ「Nordex」と「Sudwind」というブランドの風力発電機を製造している。ノーデックス社は87年には当時世界最大の250kWの風力発電機を製造したほか、95年には世界で最初のメガワット機 (1,000kW) を製造している。

これまでに中国や中央アジア、エジプト、カナダ、米国および欧州など世界中の25カ国に1,500基以上を供給し、その発電能力は総計で1,200MWに達している。また、世界18カ国に支社あるいは出張所を設けている。ノーデックスグループの2000/2001年度における総売上高は3億5,000万ユーロに達している。

ノーデックス社は、陸上用風力発電機としては最大級の「Nordex」ブランドの600～2,300kWのモデルと「Sudwind」ブランドの1,500kWモデルを供給するほか、洋上用の

2.5MWの大型風力発電機を供給している。

ベスタス・ウインド・システム社

(Vestas Wind Systems A/S)

www.vestas.dk

86年に設立されたベスタス社は、1898年に鉄工所として創立され、その後、農業機械などさまざまな機械類の製造を行っていた。60年代末からベスタス社の設立までの間にも、既に風力発電機を製造し、カリフォルニアのウインドファームに供給していた。

ベスタス社として運営を始めた翌年には、インドにRRB India Ltd.という子会社を設け、デンマーク政府の第3諸国援助計画の一部として、6つの風力発電機設置計画が同社を通して行われた。

現在、ベスタス社は製造工場を本社のあるデンマークのほか、ドイツ、インド、イタリア、スコットランドに設けており、2001年12月末までに4,983MWの発電能力に相当する発電機を世界中の各国に供給した。これは、世界の風力発電機市場の20%に達し、2001年には95億2,100万クローネの総売上高を上げた。2002年には北海のホーンズレウ沖に建設された160MWの世界最大の洋上ウインドファームに、2.0MWの風力発電機を供給している。

(2) 風力発電機関連企業

デンマークの風力発電機製造業の発展に伴って、関連産業の成長も促されてきた。風力発電機の回転翼や制御装置などのメーカーが、これらに含まれる。

LMグラスファイバー社 (LM Glasfiber A/S)

www.lm.dk

LMグラスファイバー社は風力発電機の回転翼を製造する会社で、過去5年間に世界各国で建設された風力発電機の45%には同社製造のものが用いられている。

同社は40年に木製家具の製造会社として創

## Report 4 .....

業し、50年代からガラス繊維を用いたヨットの船体など大型成形を開始し、社名をLMグラスファイバーとした。風力発電機用の羽根の製造は78年から始め、それ以来2001年までに6万枚を超える羽根を販売した。

LMグラスファイバー社の本社および工場はデンマークのロナスコウ(Lunderskov)にある。93年以降はインド、スペイン、米国、中国に工場を設けている。また、94年にはドイツのアエロコンストラクト社(Aeroconstruct GmbH)を傘下に収めたほか、99年にはオランダのロトーリネ社(Rotorline B.V.)の製造工場を買収している。

### デンシット社 (Densit A/S)

tms@densit.dk

デンシット社はセメントを利用した強力で耐久性の高い製品を供給している。創立は83年である。風力発電分野では、同社は洋上風力発電機の基礎を供給している。

現在、デンシット社の年間売り上げは約1億1,000万クローネで、約85%は輸出が占める。同社はドイツとオランダに営業拠点を置いているほか、米国に子会社を設け、輸出先は世界各地30カ国に及んでいる。デンシット社はセメント製造設備などの建設を行うデンマーク企業のFLSグループ傘下にある。

### ヘンペルペイント社 (Hempel Paints)

www.hempel.com

ヘンペル社は1915年にJ.C.ヘンペル氏によって設立された塗料メーカーである。同社は各種船舶やヨットなどの塗料を製造し、デンマークの造船業の発展に伴って成長した。80年以降は、それまでの造船に代わって、風力発電機用の塗料供給が増加している。

デンマークのほか5カ国に24カの工場およ

び53の営業拠点を設け、150カ所に倉庫を設置している。

### KKエレクトロニクス社 (KK Electronic A/S)

www.kkelectronic.dk

KKエレクトロニクス社は81年に創立されたシステム開発企業で、風力発電機の制御システムを開発している。86~88年にはカリフォルニアに子会社を設け、ウインドファームの風力発電機のために制御システムを供給した。

現在のKK Electronic社は従業員210人で、12カ国に同社の制御システムを輸出している。

### スキャンビブ社 (Scanvib ApS)

www.scanvib.dk

Scanvib社は風力発電機用の振動吸収装置を製造する企業として90年に設立された。同社の装置はデンマークのボーナス社やNEGMICON社だけでなく、スペインのMADE社の製造する250kW以上の風力発電機に供給されている。

### (3) 風力発電研究機関

#### リス国立研究所 (Forskningscenter Risø)

www.risoe.dk

デンマークの風力発電産業が発展した背景には、風力発電にかかわる基礎研究および発電機の高い安全性能など、リス国立研究所におけるさまざまな研究がある。

リス国立研究所の風力発電部門では、エアロダイナミクス(空気力学)に基づいた設計、風力発電の試験と試験機器の開発、風力発電の安全性と標準化の研究、風力発電コンサルティング、電力システム設計と電力抑制システムの設計、風力発電に関連した気象観測のためのソフトウェア開発などが行われている。