

洋上風力発電システムに関する技術動向（続報）

海洋開発室

1. はじめに

「気候変動枠組み条約 第3回締約国会議（COP3）」いわゆる京都議定書の合意により、二酸化炭素などの温室効果ガス削減に向けた対応はもはや急務となった。このため昨今、自然エネルギーに代表される再生可能エネルギーへの関心が急速に高まっている。

自然エネルギーの利用において、現在最も普及が進んでいるのが風力発電である。風力発電は、CO₂の削減効果が高く、経済性の面からも他の発電方法と競合できることから、自然エネルギー利用の最も実用的な手段として注目を集めている。特に、欧州において風力発電は、化石燃料代価エネルギーの大本命と位置付けられ、積極的な導入が進んでいる。例えば、風力発電先進国であるデンマークにおいては、既に発電容量の20%近くを風力発電で賄っており、さらに風力タービンの製造、設置、メンテナンス等のいわゆる「風力発電産業」が国を代表する輸出産業へと育っている。また、ヨーロッパ全体で2010年までに電力供給の6~7%を、アメリカにおいても2020年までに約6%を風力発電によって賄うとの計画が進められている。

このように、かつてはそのエネルギー密度の低さから、大規模な導入は難しいとされていた風力発電は、現在、他の自然エネルギー利用を大きくリードする状況にあり、多くの国々で主要な発電方法の一つであるとの評価を得ている。その結果風力発電の世界的成長は、1994年にIEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）の報告が開始されて以来、毎年30%以上の高成長率で進展してきている。

2003年までに世界で設置された風力発電の設備容量はおよそ4,000万kWに達した（図1.1）。これは大型の原子力発電所40基分に相当する量であり、その市場規模は2003年の推定で90億USドルに及んでいる。

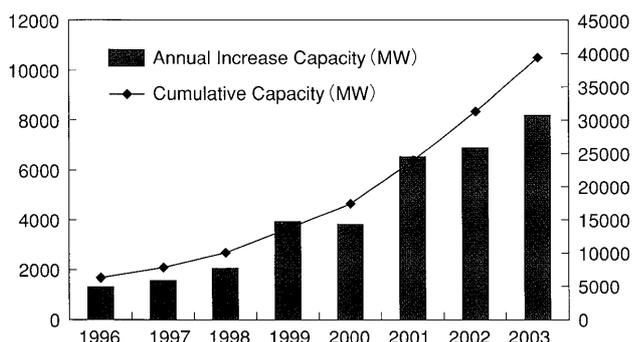


図1.1 世界の風力発電の伸び

一方、日本における風力発電は、欧州の風力先進国に比べると大きく遅れてはいるものの、2010年に設備容量300万kWという目標を掲げ、ここ2~3年急な拡大を見せてきている。

本稿では、このように現在大きな注目を集め急拡大を続けている風力発電に関し、日本海事協会誌第262号の第1報に続いて、その最新動向及び技術動向を紹介する。また、国土が狭く起伏も激しいため、陸上への大規模な導入が難しいとされる日本において、今後その発展が期待される「洋上風力発電システム」に関し、最新の研究動向を展望する。

2. 風力発電システム

現在一般的に利用されている大型風力発電システムの構成は図2.1のようになっている。このような水平軸タイプの風力発電機は、風のエネルギーをブレード、ハブ、ローター軸からなるローター部によって回転力に変え、これにより発電機を回転することで電力エネルギーを得る。得られた電力は、トランスによって昇圧され電力系統に送電される。電力系統への連結方法はDCリンク方式とACリンク方式とに分けられる。

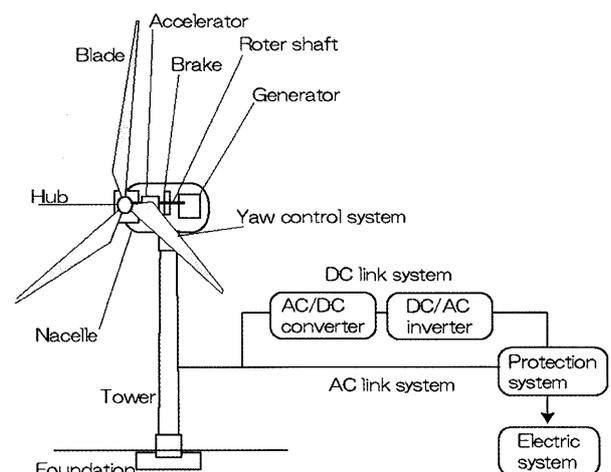


図2.1 風力発電システムの構成

2.1 ブレード（翼）

大型の風力発電機のブレードは通常3枚である。ブレードの枚数を増やすと得られるトルクも増すが、コストが高くなり、ブレードを取り付けるハブの部分にも問題が生じ易い。このため以前は、2枚翼の風力発電機も多く見られ

た。現在では振動が少なく安定性があるという理由から3枚ブレードが多く採用されるようになり、大型機の主流を占めている。

ブレードの材質には、軽量で耐久性のあることから、主としてガラス繊維強化プラスチック (GFRP) が採用され、落雷に備え内部に導電性の金属を入れる等の対策が施される。

2.2 増速機

風車のローターの回転数は概ね1分間当り数十回程度であるが、使用される発電機に必要な回転数は毎分1,500～1,800回転であるので、ギアによる増速を行う。しかしこの増速機は騒音発生の要因となるため、最近では発電機を多極化し増速機を無くしたギアレス風車の導入が増えている。

2.3 発電機

発電機には誘導発電機と同期発電機の2タイプが用いられている。誘導発電機は、構造が簡単で低コストであるが、出力変動に伴い電圧変動が発生するという問題がある。

同期発電機は、誘導発電機に比べ高コストであるが、出力制御が可能であり連結システムへの影響が少ないという特徴を持つ。特に欧州に比べ風の変動が大きく、連結する電力システムが脆弱な日本においては、同期発電機タイプの風力発電機が望ましい。

2.4 系統連結

風力発電機の出力を電力システムに連結する場合、トランスのみを介して直接電力システムに接続するACリンク方式と、コンバータやインバータなどから構成される電力変換装置を使用するDCリンク方式の2つの方式がある。

DCリンク方式は、発電機の交流出力を一旦直流へと変換し、さらに系統と同じ周波数の交流へと変換を行って電力システムに接続する方式で、初期投入コストは高くなるが、風力発電システムの問題点である風速変動による電圧・周波数の変動をなくし、品質の高い電力として系統に連結できるといった利点がある。

ACリンク方式は構造がシンプルで設備費用が安いという利点があるが、得られる電力の質を確保するためには、ローターの回転数を常に一定に保つ必要が出てくる。このためブレードに掛かる荷重がDCリンク方式に比べると大きくなってしまいう上、発電効率も低下するという欠点がある。

2.5 風車の制御方式

現在の風力発電機は、発電効率を高めたり、安全な運転を行ったりする目的で、様々な制御機構を備えている。このうちローターの回転数を制御する方式としては、ピッチ制御とストール (失速) 制御がある。

ピッチ制御とは、ブレードの取り付け角 (ピッチ角) を変化させることで出力を制御するもので、一般に油圧またはステップモータにて駆動する。ピッチ制御システムは、出力制御だけでなく、強風時にピッチ角を風と平行にして風を逃がす安全装置としても使用される。

ストール制御とは、ブレードのピッチ角は固定したまま、風速が一定以上になるとブレードの形状と風圧の特性によって減速を生じ、出力を低下させる制御方法で、ピッチ制御に比べ構造がシンプルでコストが低いというのが特徴である。

ヨー制御とは、ローターの方向を風向きに追従させるもので、これも発電効率を高め、発電機の安全を確保するために必要な制御であり、ダウンウインド型とヨーウインド型に分けられる。

ダウンウインド型ヨー制御とは、ローターに働く空気力を利用して、自動的にローターを風向きに追従させる方式である。

アップウインド型ヨー制御とは、風向センサーで検出した風向に対して、ローターが正面を向くよう強制的に、油圧または電動モータによって制御を行う。

2.6 タワー

発電機設置用のタワーには、かつて、送電線の鉄塔のような格子状トラス式のものも用いられていたが、最近では景観上の問題や、野鳥の巣作りの場になってしまう等の理由からあまり用いられない。現在のタワーの主流は円柱状のモノポール方式である。モノポールタワーの材質としては、鋼管を用いるのが一般的であるが、発電機が設置されるサイトの環境などによって、コンクリート製のタワーが用いられる場合もある。

2.7 風力発電システムの性能

風等の流体が単位時間当たりに運ぶ運動エネルギーは、

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot V) \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

P : 単位時間当たりのエネルギー流量 (W/s),
 m : 単位時間当たりに通過する質量 (kg/s),
 V : 風速 (m/s),
 ρ : 空気密度 (kg/m³),
 A : 受風面積 (m²)

と表される。つまり風力のエネルギーは、受風面積に比例し、風速の3乗に比例することが分かる。

これら風力エネルギーの全てが電気エネルギーに代わるのではなく、回転エネルギーへの変換効率や、回転、発電、変換時の抵抗などの影響を受ける。そして、最終的に得られる電気エネルギーは、風力エネルギーの30～40%程度になる。

実際の運用を考える際には、このようなシステムを持つ発電効率に加え、年間を通してどの程度効率よく発電を行えるかという設備利用率が問題になる。設備利用率は次の式で定義される。

$$\text{UtilizedCapacity}(\%) = \frac{\text{AnnualProduction (kWh)}}{\text{RatedOutput (kW)} \times \text{AnnualCalendarTime (8,760h)}} \times 100$$

この設備利用率の値は、一般に30%前後である。この設備利用率がどの程度見込めるか、つまり発電に適した風がどの程度吹くかということが、風力発電事業の成立において最も重要な要素となる。

3. 風力発電のメリット・デメリット

風力発電の主な利点は以下とおりでである。

- (1) 自然の風エネルギーの利用により燃料が不要
- (2) 運転に伴う排気ガス等の廃棄物が出ない
- (3) 発電原理・構造がシンプルで設備の耐用年数も比較的長い
- (4) 発電機の製造時も考慮したライフサイクル通してのCO₂排出量が、他の発電方式に比べ極めて少ない (図3.1)

また、主なデメリットとしては以下の項目が挙げられる。

- (1) 出力が一定でなく電力の安定供給面での課題がある
- (2) 発電機の設置場所が、風量の見込めるサイトに限定される
- (3) 住宅に近い場合、騒音問題が発生する
- (4) 高さ数十m以上の構造物であり、景観に影響を与える

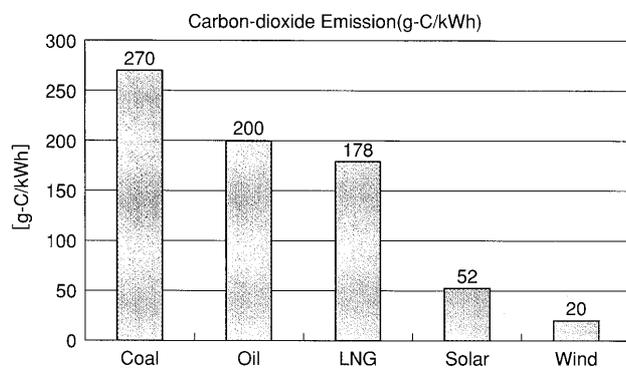


図3.1 発電方式別CO₂排出量

4. 日本の風力発電

日本における風力発電の設備容量は2002年度末で46万kW、2003年度末には60万kWを大きく超えたとみられる (図4.1)。

今後は2010年の導入目標300万kWに向け、さらなる拡大が望まれている。しかしながら日本における風力発電の伸びは、この先頭打ちになるとの予測も出ており、現状の制度のままでは2010年の導入量は200～260万kW程度に止まるのではないかと見られている。

日本における風力発電の導入を妨げる要因としては、主として以下の事柄が挙げられる。

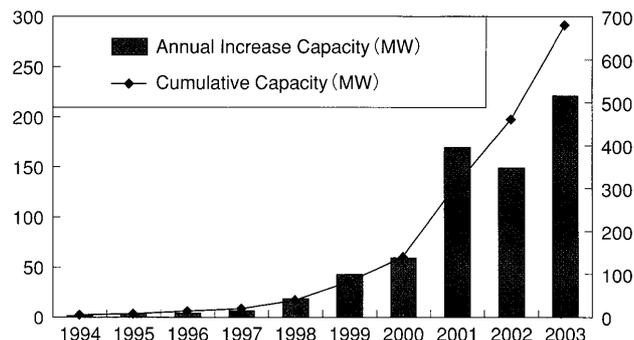


図4.1 日本の風力発電の伸び

- (1) 日本の国土は起伏が激しく、安定した風の吹く場所が少ない
- (2) 風況の良い場所は、山岳地帯であったり、道路や送電系統から離れた場所が多く、発電機の設置が困難
- (3) 法律や、電力の買い取り制度、認証制度等の発電事業を支援する環境が未整備
- (4) 欧州等に比べ送電系統が脆弱で、系統接続の面で課題が多い
- (5) 台風や、冬季の落雷に対する対策が必要

これまでは主に(1)や(2)の理由から、日本において風力発電の大規模導入は難しいと考えられてきた。さらに、電気事業者による不透明な買電条件、海外に比べて割高な建設コスト等が足かせとなって、日本の風力発電事業の拡大を阻んできたとも言える。しかしながらCO₂削減目標に向けた取り組みが待ったなしの状況にあることや、欧州での風力発電事業の成功例を受ける形で、日本においても風力発電への関心が高まり、近年本格的な導入が検討されてきている。

さらに、電力会社に新エネルギー導入を義務づけるRPS法案 (「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」(新エネ利用特措法) : 電気事業者に、新エネルギー等から発電される電気の利用を義務づけることにより、電力分野における新エネルギーなどの更なる導入拡大を図る法律、通称RPS(Renewables Portfolio Standard)法) が2003年4月に施行され、これによって電力会社は2010年までに再生エネルギーの比率を1.35%に引き上げることを義務づけられることとなった。また、港湾・国有林・自然公園内での風力発電に対する規制緩和も関係省庁による検討が行われる等、2010年300万kWの導入に向け、官民一体の取り組みがはじまろうとしている。

5. 洋上風力発電

洋上風力発電は、日本が3万km超の海岸線を有する海洋国家であるという地理的条件を生かせることから、大規模な風力発電立地の可能性を有している。洋上風力発電システムは陸上の設置に比べ、以下に挙げるように利点が多い。

このため欧州各国では、新たな風力発電立地の主力は洋上へと移りつつある。

洋上風力発電の利点としては以下の事項が挙げられる。

- (1) 風速が陸上に比べて強く、発電量が向上する
- (2) 風向・風速の変動が小さく、設備稼働率が向上する
- (3) 高さ方向の風の乱れが少なく、風車に与える機械的疲労が軽減される
- (4) 騒音公害がなくなり、景観の問題も軽減される
- (5) 大規模なウインドファームの立地が可能でスケールメリットを発揮できる

このような利点の一方、洋上風力発電は陸上に比べ設置時及び送電設備建設のコストが高く、波浪や海水腐食の影響を受け、また、漁業補償の問題が発生する等の新たな課題も存在する。それでも安定した風の吹く洋上設置は魅力的であり、例えば単純に風速が20%増すと発電量はその3乗に比例して約70%増大することから、欧州、とりわけドイツやデンマークにおいては大規模な洋上風力発電施設が次々と計画され、一部は既に稼働中である(図5.1)。

日本においても、陸上における土地利用の制約や環境・景観への影響といった理解が進むにつれ、近年洋上風力発電への関心が急速に高まっている。



図5.1 デンマークの洋上風力発電ファーム
(出典: compositesworld.com)

6. 浮体式洋上風力発電

沖合まで遠浅の海が続く欧州においては、海底固着式の風車を設置することが一般的である(図6.1)。

しかしながら、日本沿岸のように水深が深く、起伏も大きい地形では、固定式の設置は限られたものになってしまう。このため浮体式の洋上発電システムの実現が望まれている。

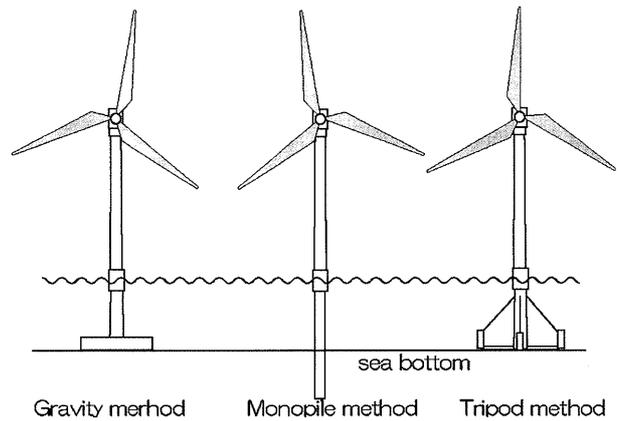


図6.1 海底固着方式

浮体式の洋上風力発電システムは現在、概念設計の段階を経て、浮体の挙動特性に適合した発電システムの研究・開発段階に入っている。既に国内の複数の企業及び研究機関において、4~5年後の実用化をも睨んだ研究開発がスタートしている(図6.2)。

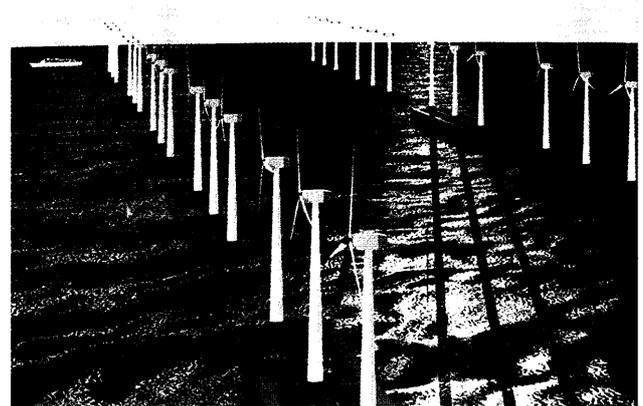


図6.2 浮体式洋上風力発電
(画像提供: 海上技術安全研究所)

浮体式風力発電設備の実現に向け、今後検討が必要な技術課題としては、主に以下の事柄が挙げられる。

- (1) 大規模、大容量化
- (2) 海洋の自然環境(波浪・腐食環境)に対する耐久性
- (3) 送電設備或いは新しいエネルギーの輸送形態の開発
- (4) 許容傾斜角の設定
- (5) 浮体の運動に伴う風向・風速変動影響の解明
- (6) 洋上点検・維持補修技術の開発

7. 日本のメーカーの動き

洋上風力発電施設、特に浮体式のシステムが実用化されると、コンサル業務の依頼等、本会業務にも関連が出てくることが予想される。そこで、国内の主要重工業メーカー4社について、風力発電事業の現状と浮体式システム開発の展望を纏めた。結果を表7.1に示す。

日立造船は2003年に「浮体式洋上風力発電システム」の水槽実験を行い、強風時の浮体の傾きを13度以内に、通常運転中は3度以内に傾きをコントロールできることを確認している。単機出力3MW(エコテクニア製)を想定した50分の1モデルを用いて水槽実験を行い、洋上浮体式風力発電の大きな課題とされる波浪・強風下での性能について、最大波高17m、風速25m/sクラスまでの条件下で、浮体の傾き制御が可能であるとの実験結果を得ている。今後は風車メーカーとタイアップして実機を作成し、2006年中に洋上での実証実験、その後の事業化を目指し現在開発を推進中である(図7.1)。

石川島播磨重工は洋上風力発電の実用化に向け、造船事業の関連企業アイ・エイチ・アイ・マリンユナイテッド(IHIMU)と共同で、横浜事業所の技術研究所が保有する実験水槽にて縮小モデルを用いた実験を行う。

IHIMUが浮体構造物を製作、石川島播磨重工が風車を設置するという形態で、洋上浮体式大型風力発電基地の開発を進め、5年程度の開発を経ての実用化を目指している(図7.2)。

日本で唯一の大型風車メーカーである三菱重工は、今後の更なる需要増を予測し、長崎造船所の長浜船台跡地に風力発電装置工場を新設する等、積極的な事業拡大を行っている(図7.3)。また、今後の洋上風力発電の拡大を見込み、洋上設置を想定した大型機の開発や、浮体方式による洋上設置の検討も進めている。

川崎重工は風車生産で世界最大のヴェスタス社(デンマーク)及び国内の他業種企業と提携し、日本初の洋上風力発電の設置を手がける等、まず港湾部・沿岸部での海底固着式から、国内での洋上風車の設置実績を重ねつつある(図7.4)。

表7.1 国内重工メーカーの風力発電事業と洋上風力への取り組み

	三菱重工	IHI	川崎重工	日立造船
大型風車技術	自前開発・製造	ノルデックス(独)	ヴェスタス(デンマーク) 世界最大の風車メーカー	エコテクニア(スペイン)
納入実績	1619基	自社開発の中型機を中心に 十数基	国内に22基	設置実績あり
納入実績(MW)	794MW	十数MW	数十MW	数MW
洋上風力	洋上設置を前提とした大型機(2MW)を開発・設置 実績有(陸上設置)	ノルデックス(独)製2.5MW 基5基からなる浮体式の 発電ユニットを開発中	日本初の洋上風車(固定 式・港湾)を北海道瀬棚 町に設置	2003年に浮体式発電シ ステムの水槽試験を実施 し、動揺特性等を把握
今後の動向	受注増をにらみ風車製造 拠点(長崎)を拡張中	IHIMUと共同で水槽実 験を実施し、2007年度の 実機製作を目指す	既に国内向け洋上風車 を数基受注済み	2006年の実機製作、2007 年の事業化を目指し開発 中

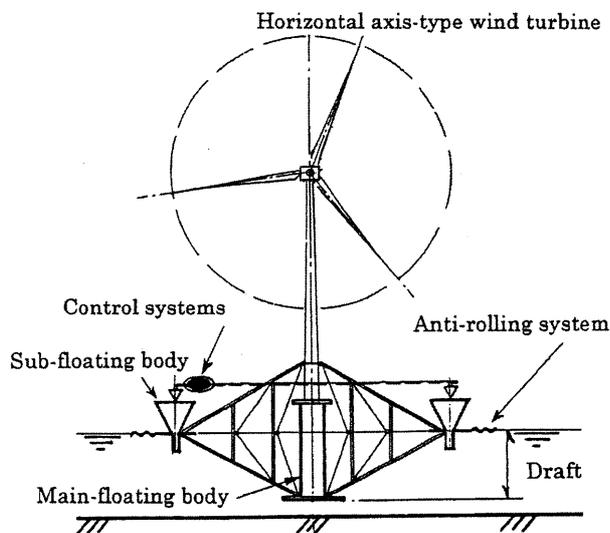


図7.1 浮体式洋上風力発電システム(日立造船)
(出典:参考文献2)

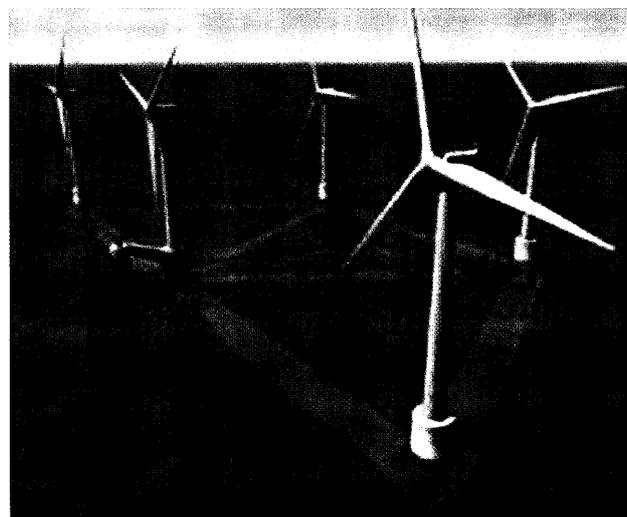


図7.2 浮体式洋上風力発電システム(IHI)
(出典: IHIMU www.ihim.co.jp/ihimu/)

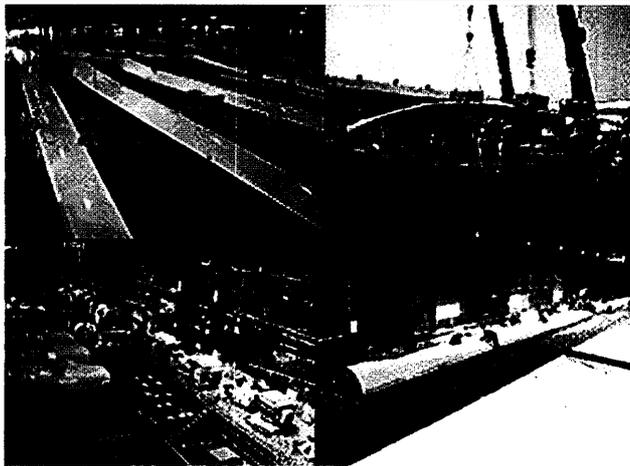


図7.3 風力発電装置の製造

(出典：三菱重工の風力発電サイト mhi.co.jp/power/wind/)



図7.4 日本初の洋上風力発電施設

(出典：北海道瀬棚町HP www.setana.jp)

8. 風力発電の認証制度

欧州などでは、風力発電事業を進めるに当たって、調査段階より、風力発電に関する適合性評価（認証）を受けることが一般化している。

8.1 風力発電の認証とは

風力発電の認証は設備機器の性能に関する技術検証としての「型式認定」と、設置環境への適合や施工時の検査といった「サイト認証」とから成る。

事業の出資者と設備納入業者双方のリスクを減らし、事業の安定性と投資対象としての透明性を確保する目的から、事業者、投資家、保険会社等から風力発電事業をビジネスとして成立させるための必要要件として、これらの認証取得が要求されるようになった。また、国によっては風力発電機の認証取得が、法的或いは建設許可の要件となっており（デンマーク、ドイツ、ギリシャ等）、以前は法的要求のなかった米国や新市場である中南米、アジア、オセアニアにも認証取得の要求が広がりがつつある。

8.2 認証機関と認証基準

風力発電機の認証制度は元々GLのノンマリン部門(GL Wind)として創設されたものであり、デンマークにおいてはDNVも同様の認証を行っている。現在、国際電気標準会議(IEC)の場においても風力発電事業に関する適合性評価基準が整備されているが、IECの基準はGL Windの基準に準拠した内容となっており、この分野においてはGL Windの基準がde facto standardとなりつつある。

8.3 日本の認証制度

日本においてもIECの基準をベースとした認証基準の作成が進められているが、この基準は、日本の独特の環境・風土に適合したものであることが求められる。

現時点では、国内において風力発電施設のための認証取得は法的に要求されていない。風力発電事業を行う場合、建築基準法や電気事業法、自然公園法といった元来風力発

電施設の建設を考慮していない法律に照らして、事業の許可が下りているという実情がある。このため、欧州の規格に沿って作成された風車が適切なサイト認証を受けることなく設置されるケースも多く、日本特有の、風の乱れによるブレードの疲労、台風、落雷といった原因により、風力発電機が損傷するケースが増えている。このような状況は、国内における風力発電のイメージ悪化に繋がるため、事業者や設備業者の中からも、日本の風土に合った基準の整備と適切な運用を望む声は強い。

9. まとめ

風力エネルギーの利用は、環境問題への対応やエネルギーの安定供給確保に貢献することに加え、新規産業や雇用の創出に資するなど様々な意義を有している。

日本の風土に適合する風力発電システムとしては、風向・風速変動等の動的荷重に耐えられること、台風や地震があること、運搬用道路が未整備な場所でも建設できることなどの様々な課題を満たすことが要求される。また今後、日本において風力発電を電力基盤にまで高めるためには風況が良好な洋上への展開が必要である。

浮体式の風力発電システムに関しても、既に4～5年後の実用化を目指した研究開発が進められており、近い将来、風力発電用途に海洋構造物が利用される可能性は高い。今後、この分野における浮体構造技術の更なる進展が期待される。

参考文献

- 1) 海洋開発室：洋上風力発電システムに関する技術動向－日本海事協会誌 第262号
- 2) 村上光功（日立造船）：浮体型洋上風力発電システムについて－17th Ocean Engineering Symposium July 17-18,2003

- 3) 太田真ら (三菱重工) : 箱型浮体式洋上風力発電設備の耐波性能に関する検討 - 17 th Ocean Engineering Symposium July 17-18,2003
- 4) American Wind Energy Association : Wind Power Outlook 2004
- 5) American Wind Energy Association : Global Wind Energy Market Report
- 6) Horns Rev Offshore Wind Farm Environmental Impact Assessment Summary of EIA Report
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 : 日本における風力発電の導入可能性調査
- 8) 清水幸丸 : 風力発電入門 パワー社
- 9) 牛山 泉 : 風車工学入門 森北出版株式会社
- 10) 金剛正夫 : 浮遊式風力発電について - 第2回 風力エネルギー利用総合セミナーテキスト
- 11) 荒木由季子 (資源エネルギー庁) : 風力発電普及政策とその動向
- 12) 上田悦紀 (三菱重工) : 風力発電の最近の動向と三菱風車 - (社)日本船舶機関士協会主催講演会資料
- 13) 小川晋 (日本電気工業会) : 欧州における風車認証機関・試験機関の現地調査報告
- 14) 例えば, 日刊工業新聞 : 「三菱重, 初の大型受注 国内最大, 4万kW」 2003.04.07記事
- 15) 例えば, 日刊工業新聞 : 「洋上風力発電国内で始動」 2002.09.23記事
- 16) 例えば, 日立造船ニュースリリース : 「浮体型洋上風力発電システムの開発を本格的にスタート」 2003.02.12記事
- 17) 例えば, NIKKEI NET : 「国立公園の風力発電施設建設の基準案・環境省検討会」 2004.01.20記事
- 18) Garrad Hassan Japan Limited : 風力発電機の認証について
- 19) 石田博 (日本風力エネルギー協会) : 風力発電 日本の現状と問題点