

一般社団法人 日本風力エネルギー学会

世界の風力発電の動向



2017年1月31日

一般社団法人
日本風力エネルギー学会
代表委員 鈴木章弘
<http://jwpa.jp/>



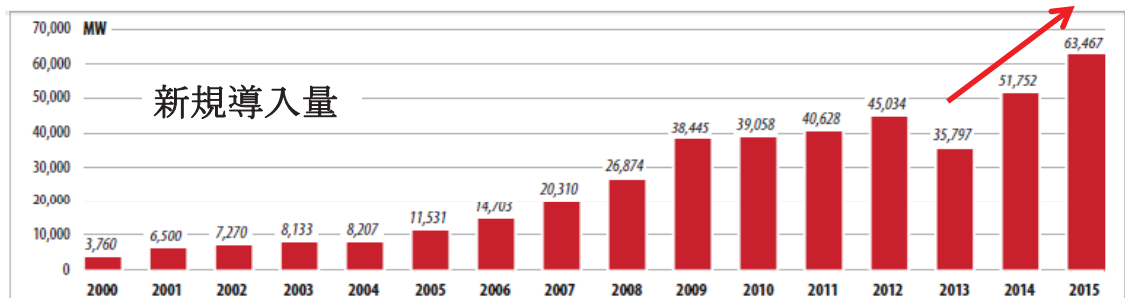
JWPA 一般社団法人
日本風力発電協会

1

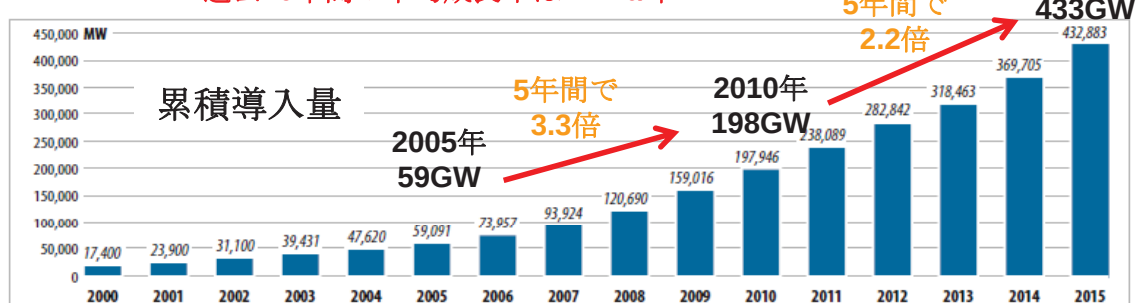
1. 世界の風力発電：2015年末現在

- ・世界で 30万台・4億3300万kW の風車が回っています。
これは日本の全部の発電設備の合計(約2億9200万kW)より多い。
- ・2015年に新しく建った風車は 3万台・6300万kW です。
- ・世界の電力の4%は風車が供給しています。

2013年の落込から
14・15年は急回復



過去10年間の平均成長率は+22%/年



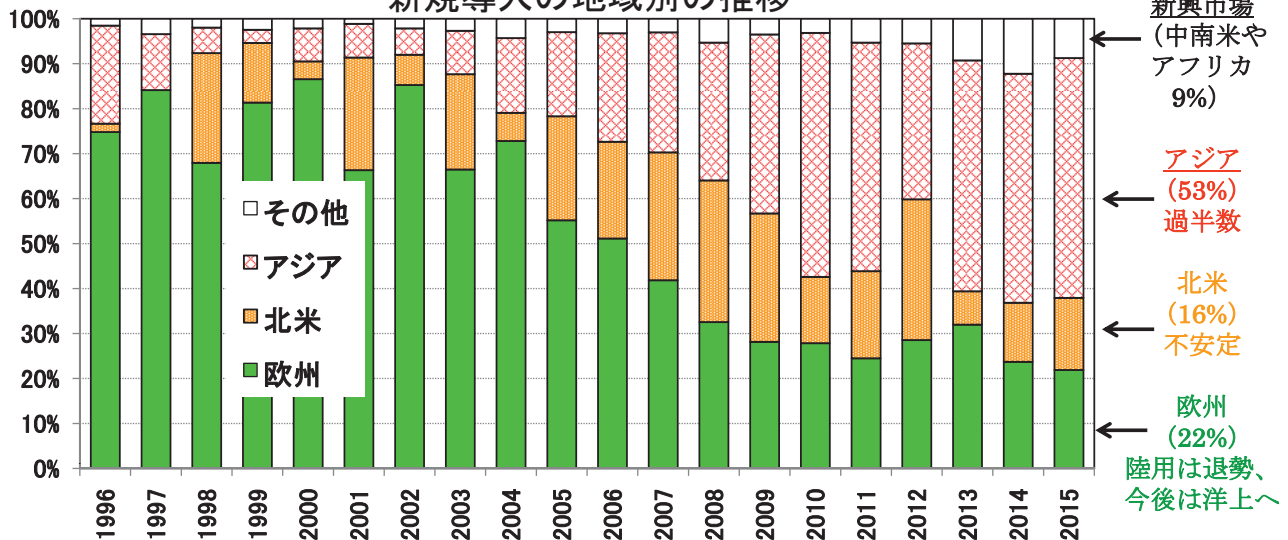
出典：GWEC Global Wind Statistics 2015

2

主流市場は、欧州→米国→アジア→新興市場へ

- ・2002年までは約80%の風車が欧州に建っていましたが、
- 1998年から北米(米国とカナダ)が伸び、
- 更に最近ではアジア(中国とインド)が世界の半分を占めています。
- 今は中南米(ブラジルとメキシコ)、今後はアフリカ等の新興市場に期待。

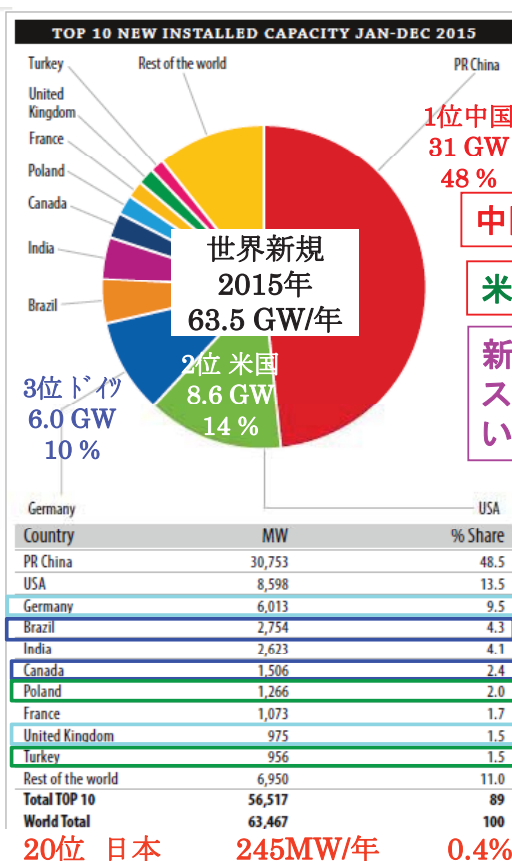
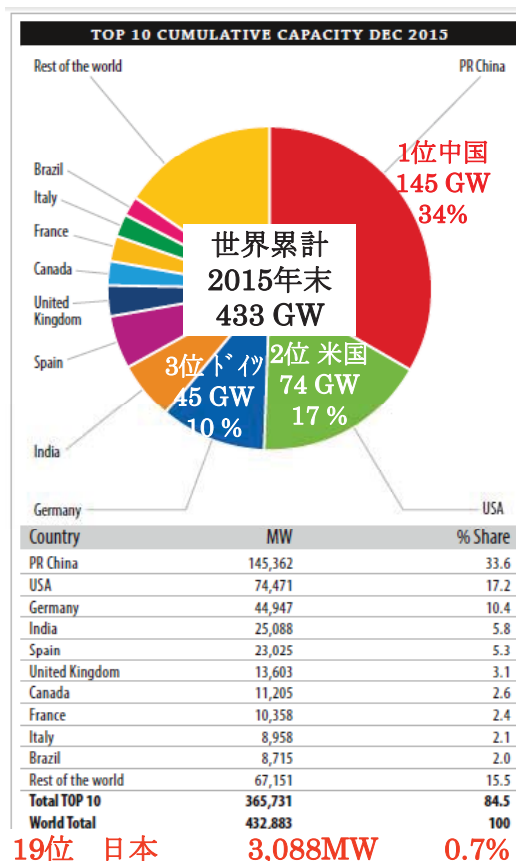
新規導入の地域別の推移



出典：Navigant/BTM, World Market Update 1997-2015

3

各国の風力発電の導入量：中国が1位



年1GWで
8位入賞！

中国が約半分

米国が復調

新規上位に
スペインが
いない！

新興市場

ドイツ洋上

南米&
北米カナダ

東欧

北海洋上

東欧

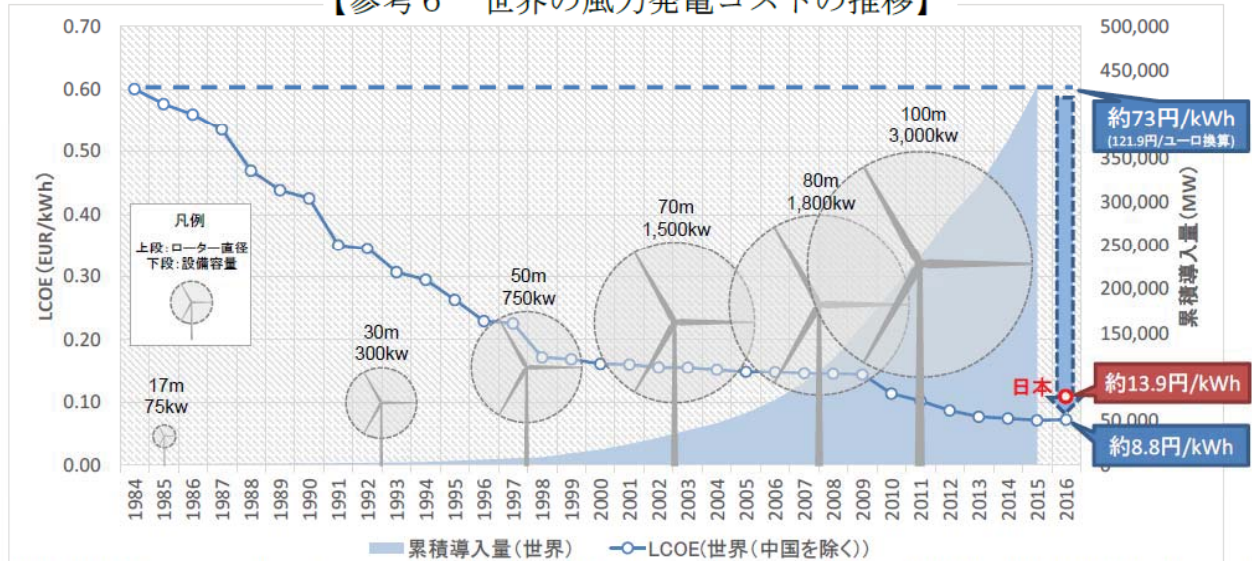
出典：GWEC Global Wind Report 2015

4

風力発電の経済性は向上を続けている

- ・陸上は、好条件の米国では2～3円/kWh
- ・洋上風力も、2016年7月オランダ入札では72.70ユーロ/MWh(8.1円/kWh)、同9月デンマークの近海入札では60ユーロ/MWh(6.9円/kWh)。(海底送電線費用を含めると約+2円/kWh)

【参考6 世界の風力発電コストの推移】



出典：The future cost of onshore wind (Bloomberg New Energy Finance, 2015)、IEA Wind Task 26 “The Past and Future Cost of Wind Energy”(IEA, 2012)を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

※LCOE：均等化発電原価。ライフタイムに要するコストの総計を現在価値に割り、年間発電量に基づいて均等化して算出したコスト

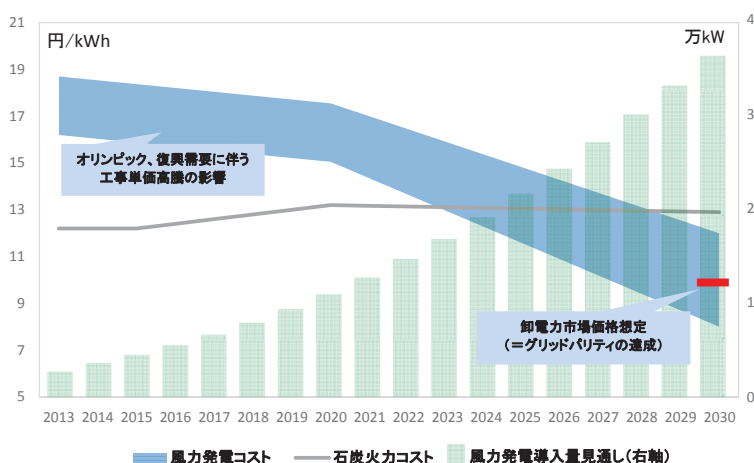
出典：風力発電競争力強化研究会について -報告書 2016年10月17日 経済産業省
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/furyoku/report_01.html

導入拡大と発電コストの低減

- ・ 2020年頃までは復興や東京オリンピックの特需による建設コストや資材費の上昇により風力発電所の導入コストの大幅な低下は難しい見込み
- ・ 2020年以降は設備利用率向上や量産効果・技術革新によるコスト低減が進み、2030年までに発電コスト※は最大8～9円/kWh程度まで低下する見通し

※利益等を含まない純粋な発電原価

2030年までの風力発電コストの低減見通し



※累積生産量拡大効果と個別技術改善効果は全く異なるアプローチでのコスト試算となる
 また、個別技術改善効果はあくまで各要素の最大値合計であり、実際は要素ごとに達成度は異なる

経験曲線でのコスト試算(累積生産量拡大効果※)

陸上風力発電導入量 (時期)	資本費	運転維持費
271万kW (2013年3月)	30万円/kW	6,000円/kW/年
294万kW (2015年3月)	31.6万円/kW	11,000円/kW/年
1,000万kW (2020年)	26.3～27.1万円 /kW	4,800～5,220円 /kW/年
2,660万kW (2030年)	23.9～25.3万円 /kW	4,098～4,590円 /kW/年

技術面でのコスト試算(個別技術改善効果※)

項目	発電コスト改善効果
受風面積50%拡大	-1.99円/kWh
長寿命化(20年→25年)	-1.88円/kWh
CMS採用による稼働率・設備利用率向上	-1.69円/kWh
ナセル20%軽量化	-1.28円/kWh
メンテナンスの効率化	-0.51円/kWh
風車効率向上5%	-0.39円/kWh
タワー高25%増加	-0.25円/kWh

➤現代の風力発電の仕組み

(風の持つ運動エネルギーの約45%を電力として取り出す)



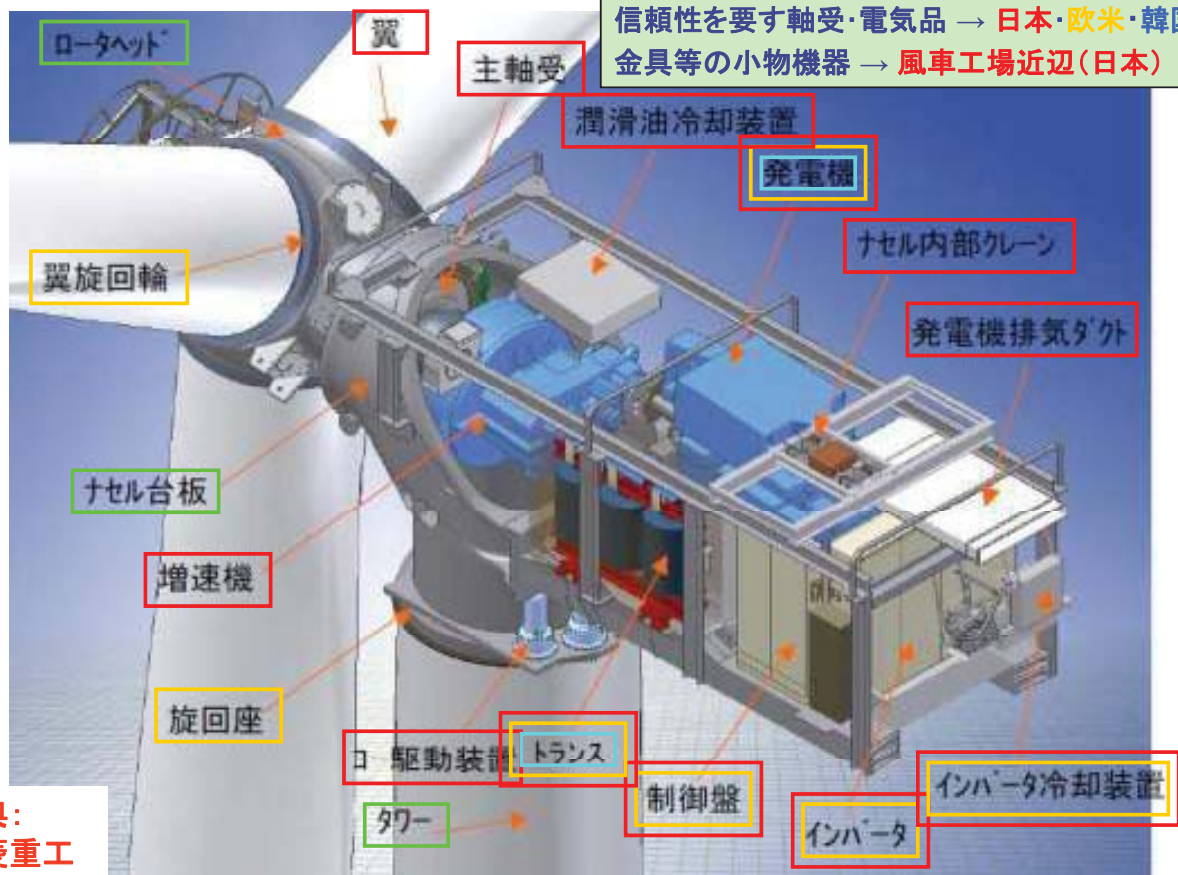
風力発電の仕組み

- ① 風の力を大きな羽根 (ブレード) で捕まえる。
- ② 風が羽根を押す力で ハブと軸を回す。
- ③ 軸に繋がった発電機が 回って電気ができる。

大型風車の形

- ・ 細長い3枚の羽根 (ロータ)
- ・ 発電機の入った箱 (ナセル)
- ・ 上空の強い風を捕まえるための高いタワー

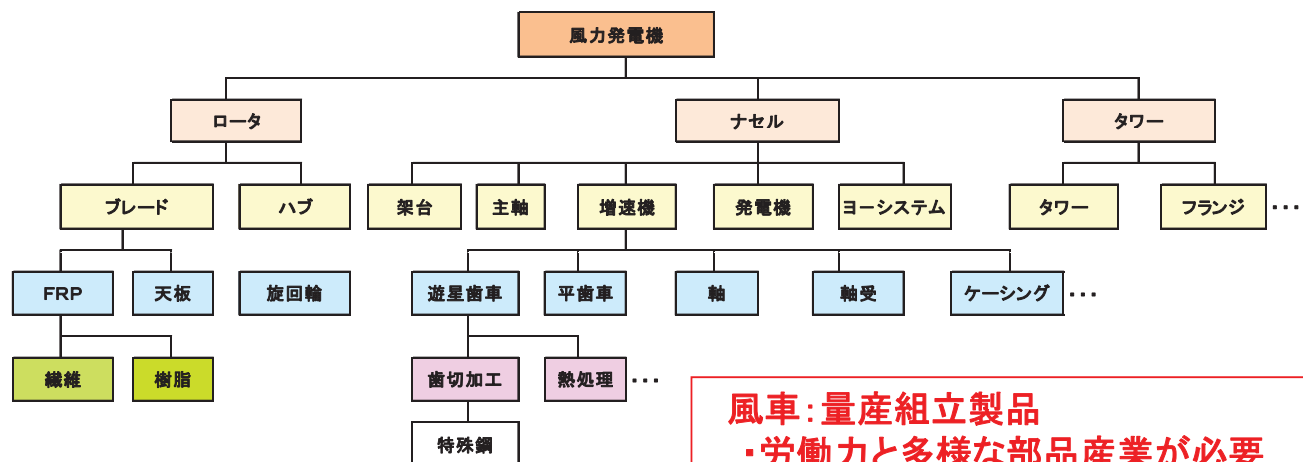
風車部品の製造: 調達先



輸送費大の翼&タワー → 建設先近辺
大重量&単価安の鉄工品 → 中国・韓国
信頼性を要す軸受・電気品 → 日本・欧米・韓国
金具等の小物機器 → 風車工場近辺(日本)

出典:
三菱重工

風力発電機の構成部品



風車: 量産組立製品

- ・労働力と多様な部品産業が必要
- ・部品点数は1万点以上

歯車



増速器



大型軸受



風車の輸送と建設

- ・タワー(3分割)、ブレード、ナセルを建設先に輸送します。
- 山間の狭い道で長大機器を運ぶには工夫が必要です。

タワーの輸送



ナセルの輸送



日本通運の起立式
ブレード輸送車



風車の輸送と建設

- ・基礎工事の後、クレーンでタワーを下段から据え付けます。
ナセルを上架して、最後にロータを取り付けて完成です。



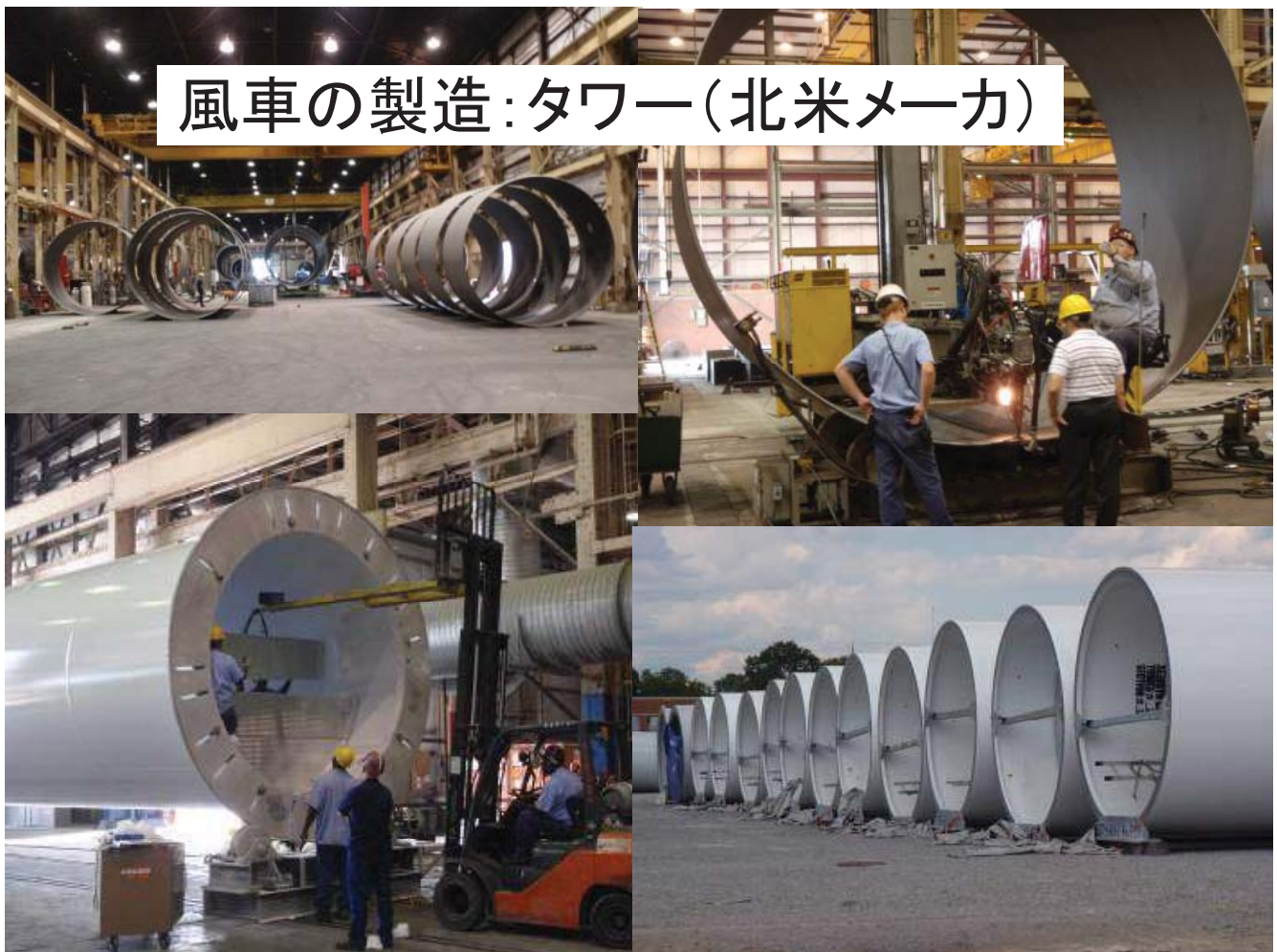
風車の製造: ナセル組立 (三菱重工)



風車の製造 ブレード製造 (メキシコ、VienTek)



風車の製造:タワー(北米メーカー)



風車部品の製造：増速機（石橋製作所）



JWPA 一般社団法人
日本風力発電協会

出典：石橋製作所

風車部品の製造：大型軸受（NTN）



JWPA 一般社団法人
日本風力発電協会

出典：NTN社ホームページ

関連機器の製造：洋上モノパイル基礎（オランダ）



JWPA 一般社団法人
日本風力発電協会

関連機器の製造：洋上基礎（英国・ドイツ）

英国



(courtesy of Burntisland Fabrications Ltd)
JWPA 一般社団法人
日本風力発電協会

ドイツ



➤ ウィンドファーム(集合型風力発電所)

- ・風が強い地域に何百台も風車を敷き詰めて、経済的に大量に発電する。(世界では既に百万kW規模)

陸上	Wind farm	Current capacity (MW)	Country	洋上	Wind farm	Capacity (MW)	Country	Turbines & model	Commissioned
	Gansu Wind Farm	6,000	China		London Array	630	United Kingdom	175 × Siemens SWT-3.6	2013
	Alta (Oak Creek-Mojave)	1,320	United States		Greater Gabbard wind farm	504	United Kingdom	140 × Siemens SWT-3.6	2012
	Jaisalmer Wind Park	1,064	India		Anholt	400	Denmark	111 × Siemens 3.6-120	2013
	Buffalo Gap Wind Farm	523.3	United States		BARD Offshore 1	400	Germany	80 × BARD 5.0	2013
	Capricorn Ridge Wind Farm	662.5	United States		Walney	367	United Kingdom	102 × Siemens SWT-3.6	2012
	Dabancheng Wind Farm	500	China		Thorntonbank	325	Belgium	6 × 5MW REpower and 48 × 6.15MW REpower	2013
	Fântânele-Cogealac Wind Farm	600	Romania		Sheringham Shoal	315	United Kingdom	88 × Siemens 3.6-107	2012
	Fowler Ridge Wind Farm	599.8	United States		Thanet	300	United Kingdom	100 × Vestas V90-3MW	2010
	Horse Hollow Wind Energy Center	735.5	United States		Lincs	270	United Kingdom	75 × 3.6MW	2013
	Meadow Lake Wind Farm	500	United States		Horns Rev II	209	Denmark	91 × Siemens 2.3-93	2009



米国 California - Mojave, 275kW x 660 台 1987~1991

➤ アメリカのウィンドファーム

テキサス州メキシコ湾岸 2008年
 2400kW × 84台 = 201.6MW
 さらに隣にも
 2400kW × 118台 = 283.2MW
 合計で、202台・484.8MW

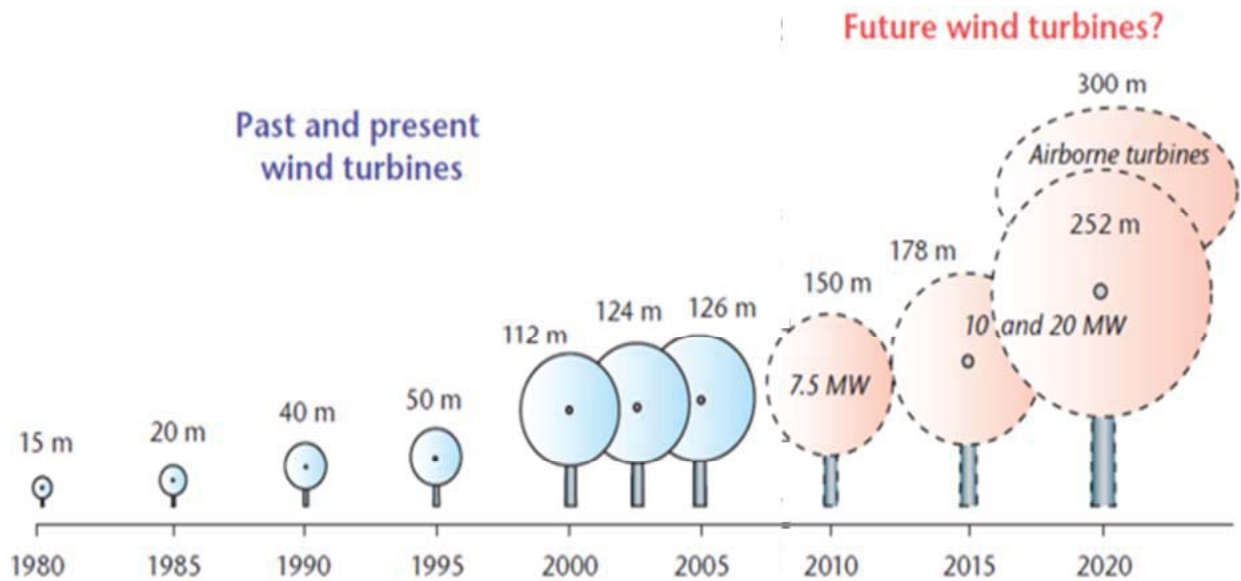


拡大



風車の大型化競争（台数減→建設費低減） 特に輸送制限のない洋上風車は大きいほど有利

Growth in size of wind turbines since 1980



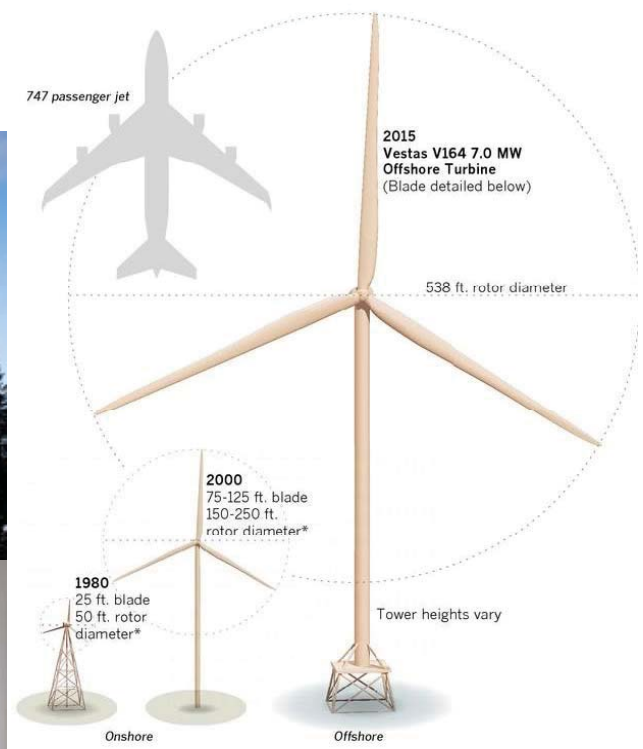
Source: Adapted from EWEA (2009).

➤ 世界最大の洋上風車の大きさ (8,000 kW)



Monster blades

Wind turbines keep growing larger, which has some people worried about negative effects on the environment and scenic views.



Just how big is the new blade?



*Measures vary by manufacturer

Sources: American Wind Energy Assn., Vestas

デンマークの洋上ウィンドファーム

海上は凹凸がなく、摩擦が小さい
⇒ 平均風速が大きい
⇒ 設備利用率が40~50%と高い
⇒ 売電収入が多い

デンマーク 東側沿岸
Horns Rev PJ 2002年運開
Vestas 2MW × 80台 = 160MW



2MW風車が10列 × 8列で並んでいる

Courtesy of Vattenfall

1991年 世界初
デンマーク東部
1.8km沖
Windeby WF
450kW × 11台



2000年、英国Blyth港の0.8km沖、2MW × 2台



1991年の世界初の洋上風力開発から、2MW級の大型風車の洋上ウインドファームまで約10年かかった



2000年、デンマーク
コペンハーゲン港の2km沖
Middlegrunden wind farm
2MW × 20台

洋上風車の基礎のタイプ

浅い←

→深い

重力式



モノパイル式



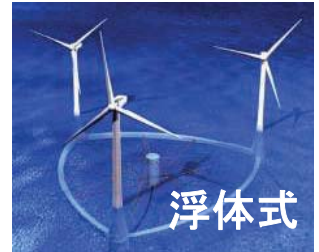
ジャケット式



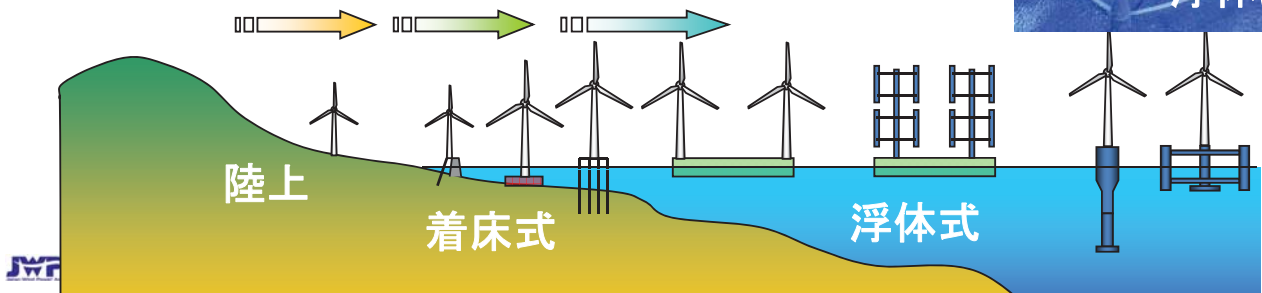
トライポッド式



ドルフィン式



浮体式



25

洋上風車の基礎の据付工事

重力式基礎: 海底を均してから基礎を置く

モノパイル基礎: ハンマーで打ち込む



ジャケット式基礎



トライポッド式基礎



26

洋上風車の出荷拠点(積出港)の整備

EWEA 2009 Stockholm 14-16 September – Port of Esbjerg



27

Bremerhavenの洋上風車基地



海底まで脚を伸ばして安定できる
建設専用船(SEP/Jack up ship)で
タワー、ナセル、ロータを組立てる。
傭船料は数千万円/日と高い。
この種の船は日本には無い。

写真: 洋上風車建設用の
Jack Up Ship (SEP)
出典: Seajacks

29

SEPの大型化

オランダのGustoMSC社
のカタログより

GustoMSC References

No.	Name	Series	Owner	Yr.
1	WIND	NG-600	DDB	1995
2	Buzzard	SEA-1250	GeoSea	1982
3	Vagant	SEA-800	GeoSea	2002
4	Pauline	SEA-900	Besix	2002
5	Wind Lift 1	NG-5300	Bard	2009
6	Goliath	SEA-2000	GeoSea	2009
7	Sea Worker	SEA-2000	A2SEA	2009
8	Seafox 7	SEA-2000	Workfox	2009
9	JB-114	SEA-2000	Jack-Up Barge BV	2010
10	JB-115	SEA-2000	Jack-Up Barge BV	2010
11	Seajacks Kraken	NG-2500X	Seajacks UK Ltd	2009
12	Seajacks Leviathan	NG-2500X	Seajacks UK Ltd	2009
13	GMS Endeavour	NG-2500X	GMS	2010
14	GMS Endurance	NG-2500X	GMS	2010
15	MPI Adventure	NG-7500/6	MPI Offshore	2011
16	MPI Discovery	NG-7500/6	MPI Offshore	2011
17	JB-117	SEA-3250	Jack-Up Barge	2011
18	Neptune	SEA-2500	GeoSea	2011
19	Seajacks Zaratan	NG-5500C	Seajacks Ltd	2012
20	Brave Tern	NG-9000C	Fred Olsen Windcarrier	2012
21	Bold Tern	NG-9000C	Fred Olsen Windcarrier	2012
22	Sea Installer	NG-9000C	A2SEA	2012
23	JB-118	SEA-3250	Jack-Up Barge	2013
24	Sea Challenger	NG-9000C	A2SEA	2014
25	Seajacks Scylla	NG-14000X	Seajacks UK Ltd	2015



Tools in the market by GustoMSC



SEA INSTALLER

6x 6MW's

GustoMSC

NG series of Jack-Up Vessels



Class	NG-600	NG-2500X	NG-5500C	NG-7500/6	NG-9000C
Number built (+ under construction)	1	8 + 5	2	2	4
Hull (m)	55 x 18	61 x 36	81 x 41	137 x 40.8	130 x 39 m
Power Gen. set (kW)	2x 560	4x 1,600	6 x 1,600 2 x 1,200	6x 2,250	4x 4,320
Crane (t @ m)	Crawler 90 t	300 t @ 16 m	800 t @ 24 m	1,000 t @ 25 m	900 t @ 24 m
Water depth (m)	25	45 - 68	55	40	45-50
Log length (m)	45	94.5	95	71.5	62.5
Leg length under hull max (m)	± 36.4	± 70	± 67	± 52.5	± 61.5
Var. load (t)	500	1,200	3,000	7,000	6,500

GustoMSC - Proprietary and confidential information. Subjected to change without any notice.



出典：Offshore-Windpark 講演資料、Udo Christiansen 氏、ABB AG 社

図 3-1 洋上風力発電施設の建設風景

31

海底送電ケーブルの敷設

ケーブル敷設船(CLV)



32

MVOW社: 洋上風車仮組立・積出拠点②



【タワー】

- 写真の巨大クレーンを用いて、この基地に運搬されてきたタワーを垂直に立て、積み出しに備えている。
- 写真の3MW機で、タワーの高さは約65m程度。現在実証中の8MW機では、これが110m程度となる予定。

【運搬船への積み込み】

- 基地内で垂直に立てられたタワーは、垂直のまま運搬船に積み込まれる。



【運搬】

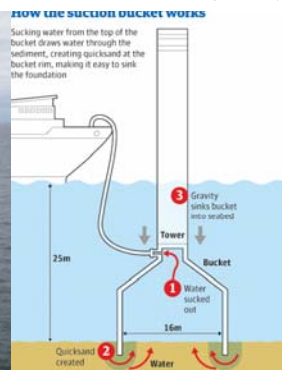
- 発電サイトまで、運搬。一度に8本程度のタワーを運搬することが可能。

出典: 資源エネルギー庁 新エネルギー小委員会 欧州調査報告 2014年8月8日
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/002_haifu.html

33

➤ コストダウンに向けた欧州の最近の動き

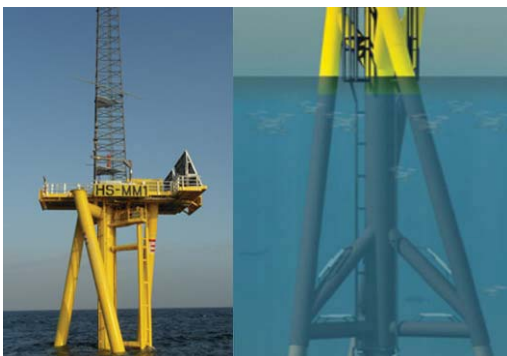
Suction-bucket式基礎の試行(基礎内面から土砂を吸引)



洋上風車の一体施工 (起立式。まだ構想段階)



Twisted-Jacket基礎の試行 (足を3本にして鋼材節約)



2枚翼風車の試行



風車一体施工建設船(構想段階)

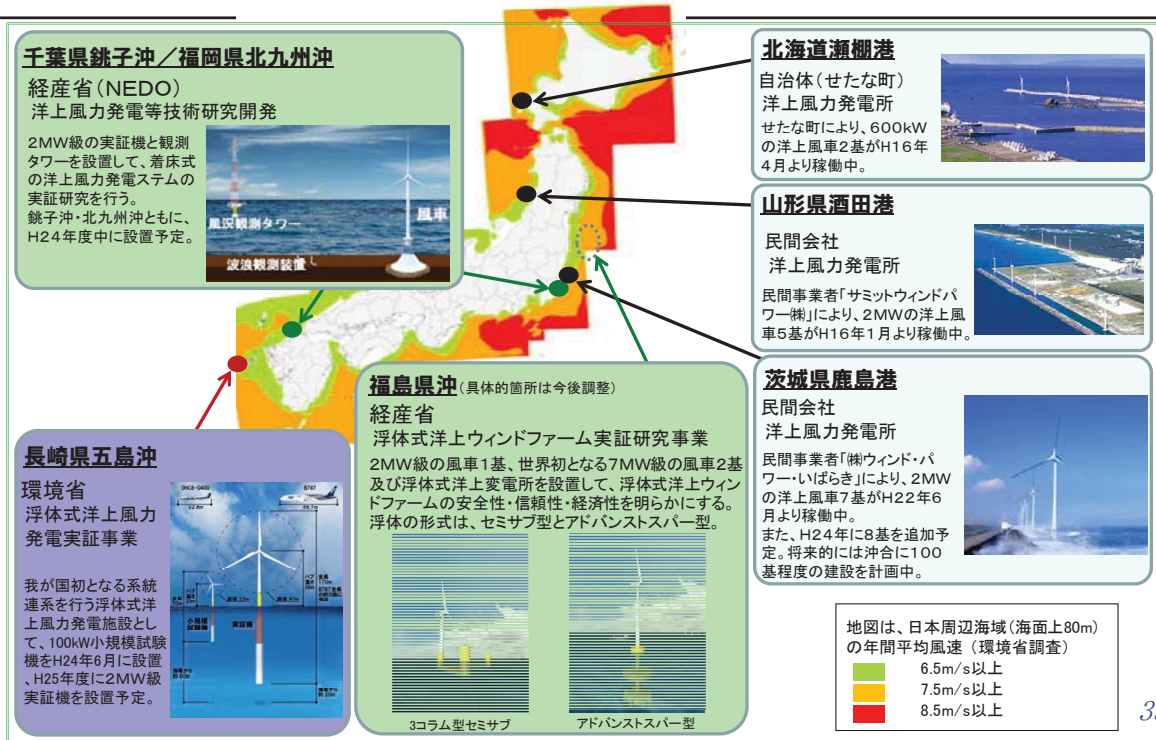


34

日本の洋上風力発電の現状

出典: 資源エネルギー庁の発表資料

- ・ 陸上に接岸する形で行っている洋上風力発電は、現在、全国3か所で事業化。
- ・ 本格的に沖合に展開する洋上風力発電は、現在は実証研究段階。今年度中に、試験機が本格的に運転を開始する予定（経産省：銚子沖、北九州沖、環境省：五島沖）。



35

日本の洋上風力開発の現状

- ・ これまでは国プロが先導。
民間は沿岸部の「ウインドパワーかみず」が主導。
- ・ 洋上風力発電のFIT価格が36円/kWhに決定。
- ・ 商業洋上風力プロジェクトが今後、具体化していく。
- ・ 港湾周辺が好条件(漁業権が消失、港湾長に許認可集約、既存産業インフラ活用)。



36

風力発電が広がる4つの理由

世界のニーズ

- 1) 環境保護
- 2) 石油代替エネルギー
- 3) エネルギー安全保障
- 4) 産業振興と雇用確保

風力発電のシーズ

発電時に CO₂ Free
 経済性・大規模化
 国内資源
 8兆円・80万人

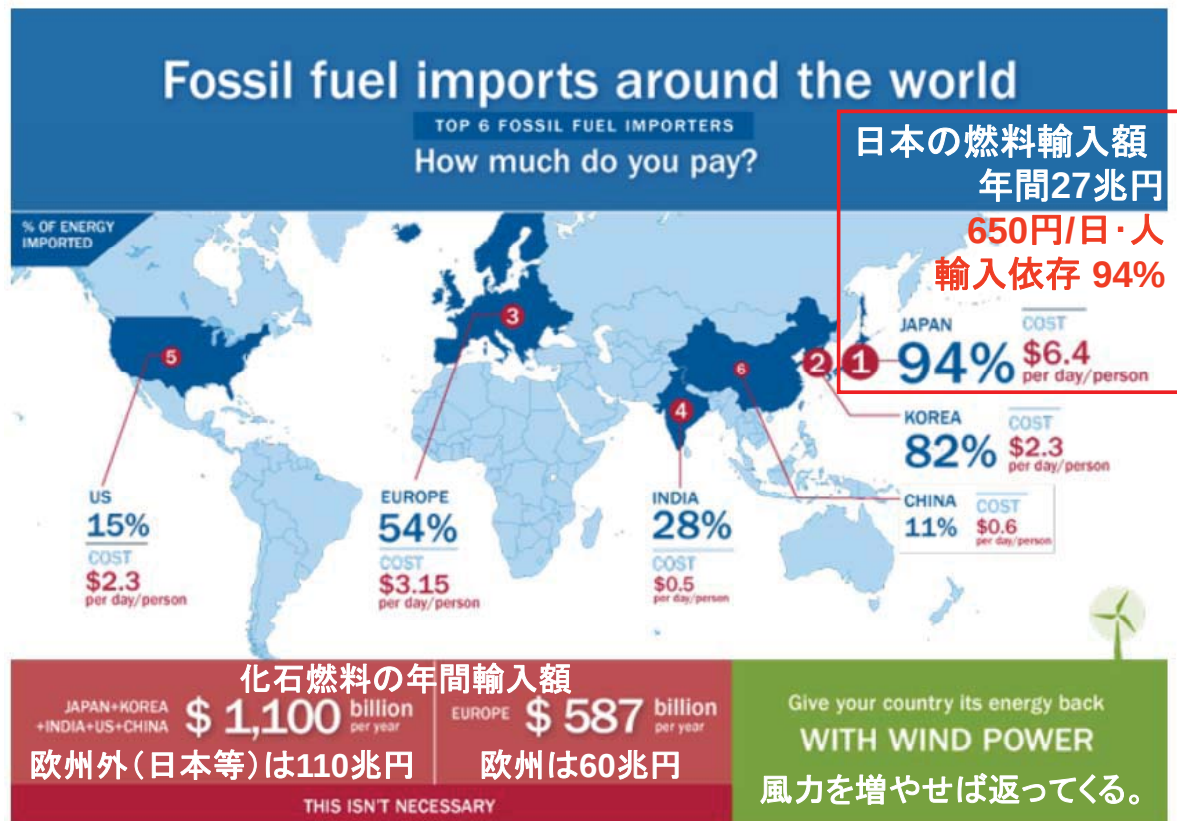
- ・経済発展と環境保護を両立させる解決策は、現時点では原子力と風力発電の2つしかない。
 (将来は、太陽光とIGCCが加わる。)
- ・身近でチェルノブイリを経験した欧州では、政治的に原子力は進めにくかった。
 → 今後は日本も同じ。

日本にとっての各種電源の得失の比較例

- ・天然ガス火力は大量備蓄が困難なので、輸入途絶時に運転が継続できない課題あり。
 本格利用には、パイプライン網と既存ガス田(地下備蓄)のインフラ整備が必要。
- ・石炭火力は燃料代は安い、環境負荷と将来の炭素税(またはCCS)負担のリスクあり。
- ・風力発電を含む再生可能エネルギーは、発電コストと地理的偏在の課題はあるが、エネルギーセキュリティと環境保護の点では極めて有効。

	原子力	石油火力	ガス火力	石炭火力	再生エネルギー
建設コスト	高い	安い	安い	安い	高い
燃料代	安い	極めて高い	高い	安い	不要
発電コスト	安い?	極めて高い	高い	安い (除く炭素税)	高い
立地	地元住民の 了解を要す	沿岸部	沿岸のLNG 基地の近隣	沿岸部	偏在性が 強い
燃料調達先	海外	主に中東	主に中東	豪州	国産資源
備蓄量	数年分	約200日	約20日	約40日	不要
環境負荷	低い?	高い	低い	非常に高い	極めて低い
事故被害	甚大	普通	大きい	普通	低い

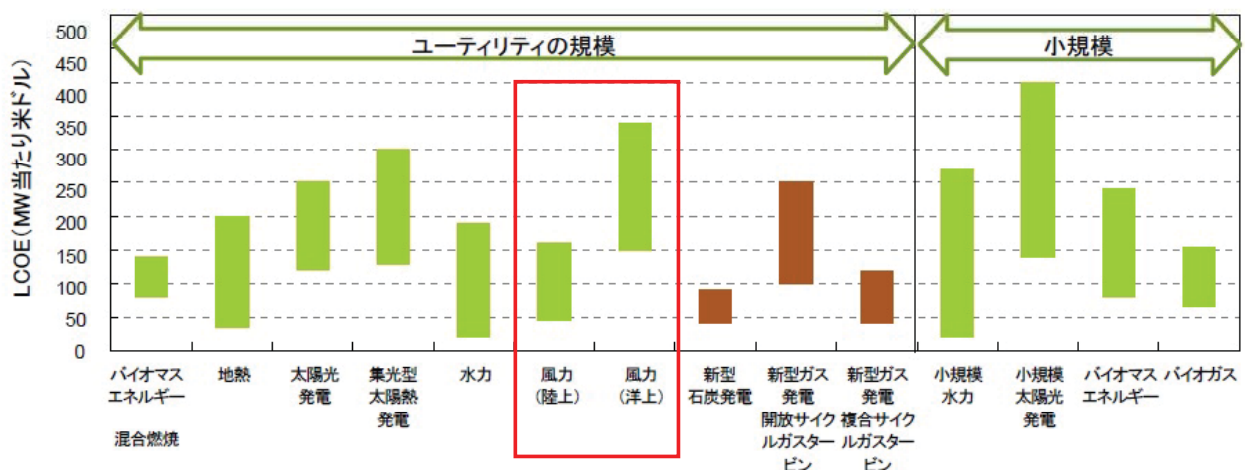
化石燃料輸入への依存度は日本が最も高い



出典: 今年のGlobal Wind DayのWebサイト <http://www.globalwindday.org/>

世界では風力発電のコストは高くない

図4.1 ●選定した発電技術のLCOE, 2013年



出典: 特に明記しない限り、本章の全ての表と図は、国際エネルギー機関 (IEA) のデータ及び分析を引用したものである。

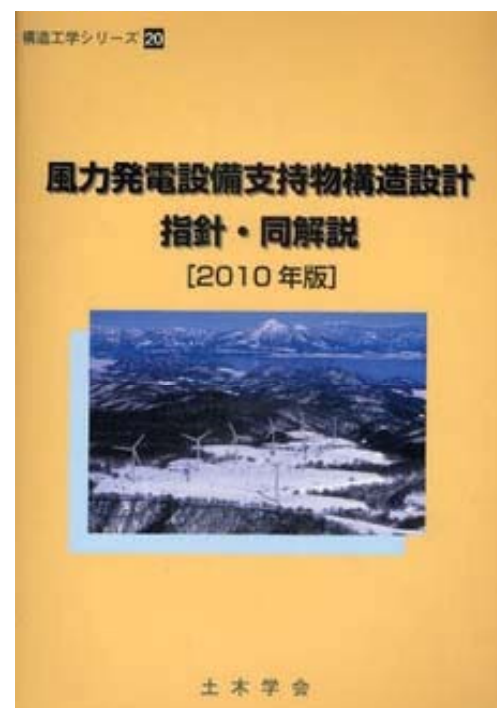
キーポイント ● 風力発電と太陽光発電のLCOEは、他の発電方式のLCOEに到達、もしくは近づきつつある。

出典: 「The Power of Transformation (電力の変革)」翻訳版 2015/4/22, NEDO

風車の台風被害(2003年宮古島)



- 土木学会で強度設計指針が見直され、
今では風車の台風被害は稀になった。
→2014年に再び大型台風が宮古島を襲ったが風車被害なし



風力発電のビジネスモデルの試算例

- 2MW風車を建てて、売電収入で回収する。

初期投資 $2\text{MW} \times 1\text{台} \times 30\text{万円/kW} = 6\text{億円}$

収入 $2\text{MW} \times 8760\text{h} \times 20\% \times 22\text{円/kWh} = 0.77\text{億円/年}$

投資回収 $6\text{億円} \div 0.77\text{億円} = 7.8\text{年}$

- 風力発電の採算向上に向けた世界の動き

米国: 数百MW(数百台)まで大規模化して 単価を下げる。

欧州: 電気の 買取価格を高くする(FIT:固定買取制)。

洋上: コスト高だが、風況が良いので 設備利用率が高い。

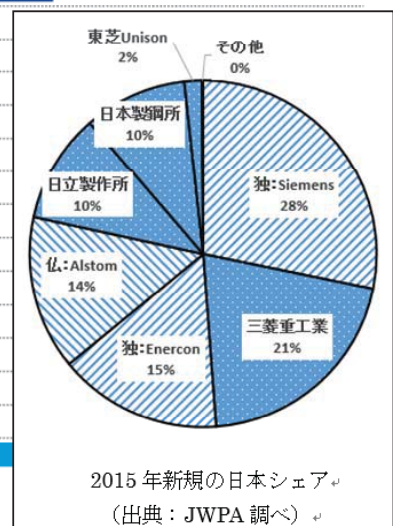
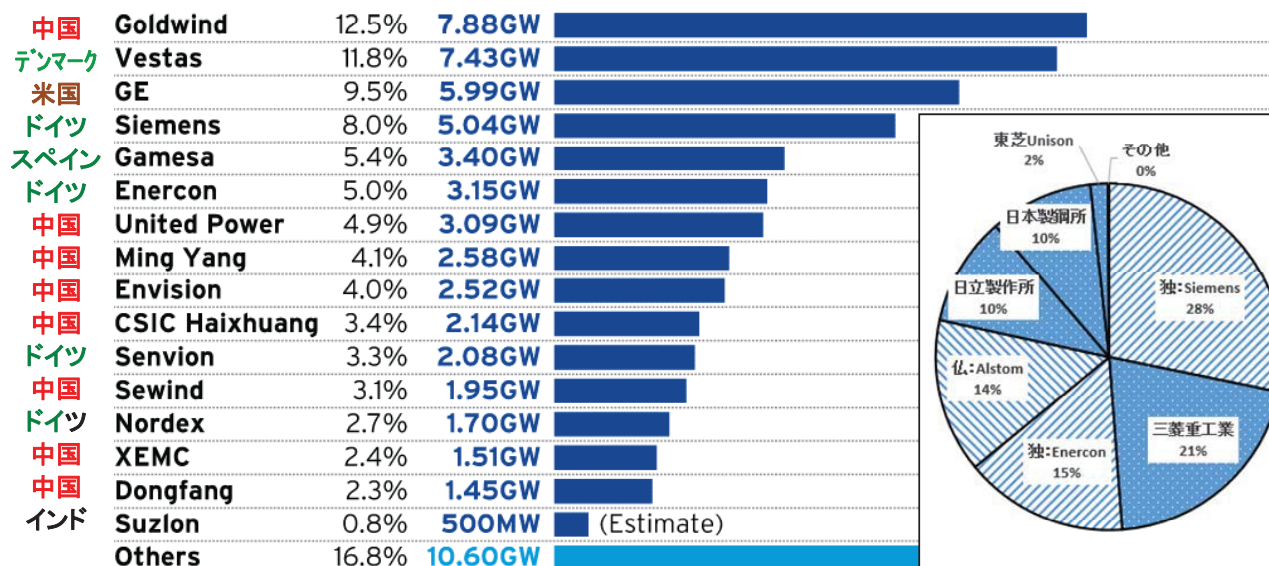
風車: 大型化してウインドファームの 建設費低減

翼長を伸ばして 設備利用率を向上

信頼性を上げて 稼働率向上と保守費用低減

世界の代表的な風車メーカー (2015年の新規設置風車の世界順位)

以前は欧州(デンマーク、ドイツ、スペイン)の風車メーカーが強かったが、最近是中国の風車メーカーが自国市場を中心にシェアを伸ばしている。日本の風車メーカー(日立、日本製鋼所、三菱重工)は国内では強い。



洋上風力発電の観光資源化(デンマークの例)

デンマークのNysted洋上風力発電所では、洋上風車が観光資源になっている。



Nysted offshore wind farm (Photo: DONG Energy)

Offshore Wind Turbines Part of Danish Touristic Offer

Fear that tourists will opt out of Søndervig region on the Danish west coast due to the Vesterhav Syd and Vesterhav Nord nearshore wind farms has got holiday home owners in the area to turn against the upcoming offshore wind projects, according to the Danish Wind Industry Association (DWIA).

At the other end of the country, which has wind turbines installed near the coast for years, this is perceived differently, DWIA said in an effort to prove that offshore wind farms can bring more good than harm to tourism.

From the beaches in Nysted, Rødby or Gedser it is possible to see the Nysted (Rødsand 1) and Rødsand 2 offshore wind farms, which consist of 72 and 90 wind turbines set up in 2003 and 2010, respectively. Both Lolland Municipality and the local tourism industry have good insight in what the wind turbines set up off the coast mean for tourism, according to DWIA. Offshore wind turbines do not scare tourists away but, on the contrary, create new opportunities to promote tourism and the use of offshore wind turbines as an attraction.

Nysted/Rodlandでは洋上風車を観光のアトラクションとして活用

DWIA cited an owner of a holiday resort in Nysted as saying that offshore wind turbines are not a nuisance for the guests, but something that creates interest with people who visit the area.

Offshore wind safari 洋上風力サファリ観光

One of the opportunities that offshore wind farms bring is the possibility to offer an offshore wind safari

あざらし(seal)と洋上風力の観光をセットで行う

"We have seen a huge demand on our safari tours that combine seal safari with a visit to the offshore wind turbines. During summer, we have two departures every day which are fully booked," said Anne Marie Larsen, the owner of the holiday resort in Nysted.

The harbour master Syen Erik Hauberg, who is engaged in running the local information and activity center "The world of wind" in Nysted, said he sees only positive effects of installing offshore wind turbines.

近隣の学校の見学や海外からの視察グループも多い

"On safari trips to the Rødsand 1, a boat can enter between the turbines and that is something that really impresses tourists. Also, our wind museum is well attended by both school groups and various bus tours, and we also get some foreign visitors, especially from Asian countries," Hauberg said.

Dong Energyによる無料洋上風力クルーズ抽選には7万人が応募した

DONG Energy witnessed the same interest in seeing offshore wind turbines up close after it offered free tickets for a boat trip to, among other, Nysted in a recently launched campaign. Across the country, 70,600 people participated in the draw for a seat, according to DWIA.

Head of tourism in Lolland Municipality, Marie Louise Friderichsen, said: "We are visited by many foreign delegations that are interested in seeing our green solutions, including offshore wind farms. Therefore, we have experienced a boost in what might be called business tourism as a result of our overall climate efforts. Moreover, we can disprove that setting up the wind turbines has had any negative effects on tourism, which generally continues to grow."

Offshore WIND Staff; Source: DWIA Posted on November 17, 2016 with tags [Denmark](#) [tourism](#)

45

➤付加価値があると見学者が集まる

茨城県のウインドパワーかみす
(2010年 富士重工 2MW×7台)
東日本大震災の津波に耐えた



長崎県五島列島の環境省浮体式
洋上風車実証プロジェクト
(日本初・世界で3例目の
大型浮体式洋上風車)



ま と め

- 風力発電は世界では既に「普通の電源の一つ」になっている。
陸上風力は好条件では既にGrid Parityを達成、洋上風力でも大型化と量産効果により驚異的な速さで経済性が改善している。
- 「立地拡大」と「経済性向上」のニーズに応えた技術開発が進む。
前者は、寒冷(Cold Climate)・台風(ClassT)・低風況(ClassⅢ)。
後者は、ロータ径拡大(長大翼)とハブ高伸展(高高度タワー)。
日本は、ClassⅢやロータ径・ハブ高拡大では、世界に遅れている。
- 洋上風力では、超大風車、大口径モノパイル基礎、大型SEP、
施工方法改善、等で発電原価削減の成果が挙げられている。
今後に向けた複数の技術開発も実証研究が進んでいる。