

2017年11月14日 京都大学

風力発電の国内外の最新技術動向と 日本の探るべき方向性

東京大学名誉教授・名古屋大学客員教授(常勤)
荒川 忠一

1. 風力エネルギーの研究
2. 日本における洋上風力プロジェクト
3. 欧州における洋上風力プロジェクト
4. 日本の探るべき方向性
5. 結語

1. 風力エネルギーの研究



- Middelgrunden 2MW x 20:コペンハーゲン沖に2000年に運開
- 世界で最も美しいウィンドファームと言われる

景観とみごとに適合したオランダ風車
社会受容性への糸口を示唆
近代風車もその心を引き継ぎたい！



世界遺産：キンデルダイク－エルスハウトの風車
世界遺産HPより

Evening on September 9, 2011
Photographer: Chuichi ARAKAWA

Mills in Floodlight
<https://www.kinderdijk.com/>
土曜は帆を張って回転

お台場風車の提案と完成

地域密着型風車の提案(ヴァナキュラー風車)



有賀・荒川らの提言などによって実現した
東京臨海風力発電所（J-POWER提供）



風車の空力騒音の研究

高周波数騒音

後縁の騒音
翼端渦騒音



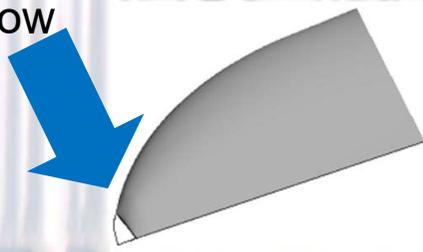
低周波数騒音

ブレードとタワーとの干渉

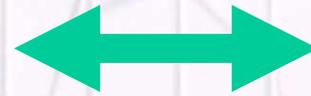
WINDMELIII

(提供：産業技術総合研究所)

inflow



現在の翼端 Actual



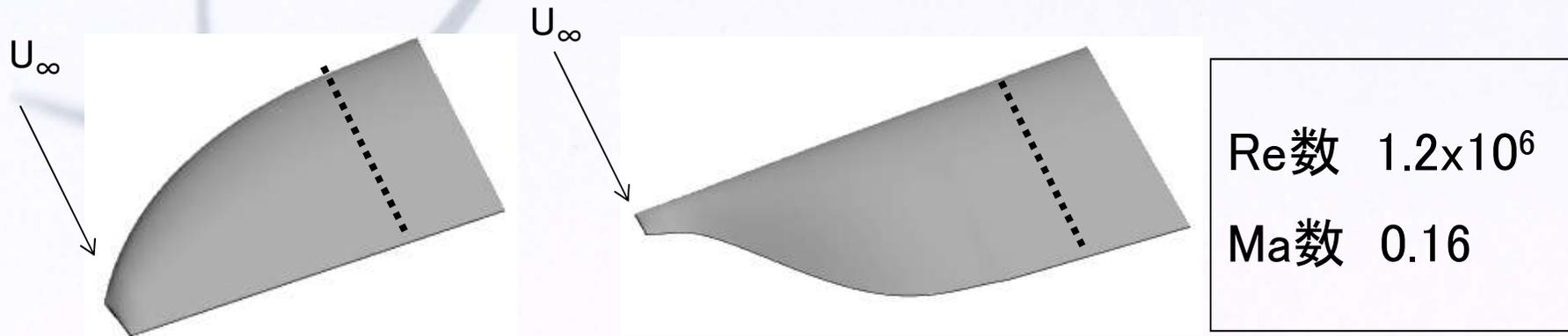
風車翼端形状による差異を確認

inflow



Ogee (S型) 翼端

地球シミュレータによる(40TFLOPS) 流体力学および空力騒音の解明



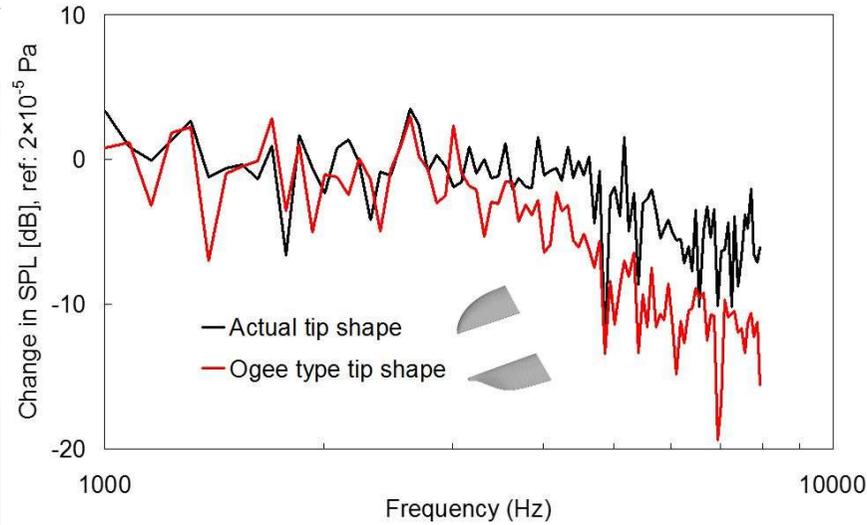
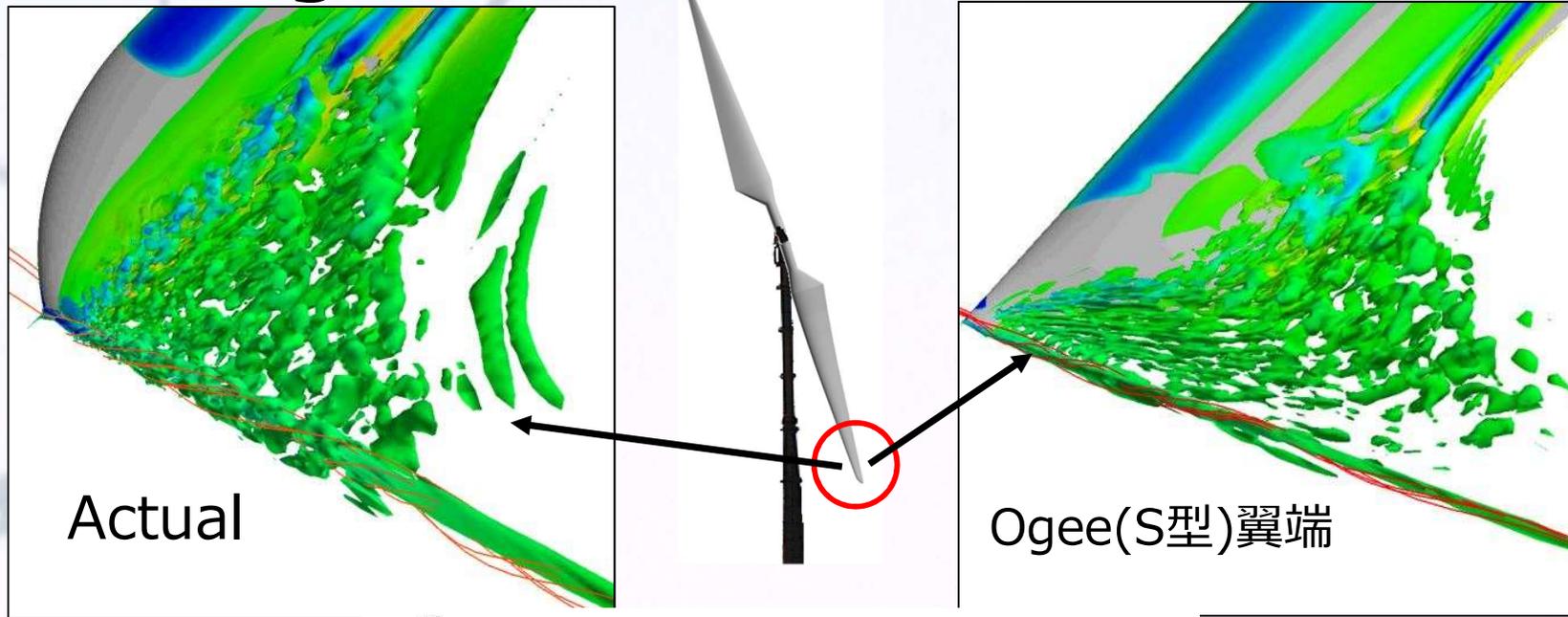
標準型

Ogee型

- ・ 回転を考慮, ブレードのみ, ハブを考慮しない
- ・ 回転座標系
- ・ 計算格子
 - $765 \times 193 \times 2209 = 3$ 億格子点数
 - $y^+ = 1$
 - 乱流モデルはLES
 - 2翼弦長で騒音計算が可能

計算結果

Ogee翼が渦の干渉が弱く低騒音



小型風車の研究開発

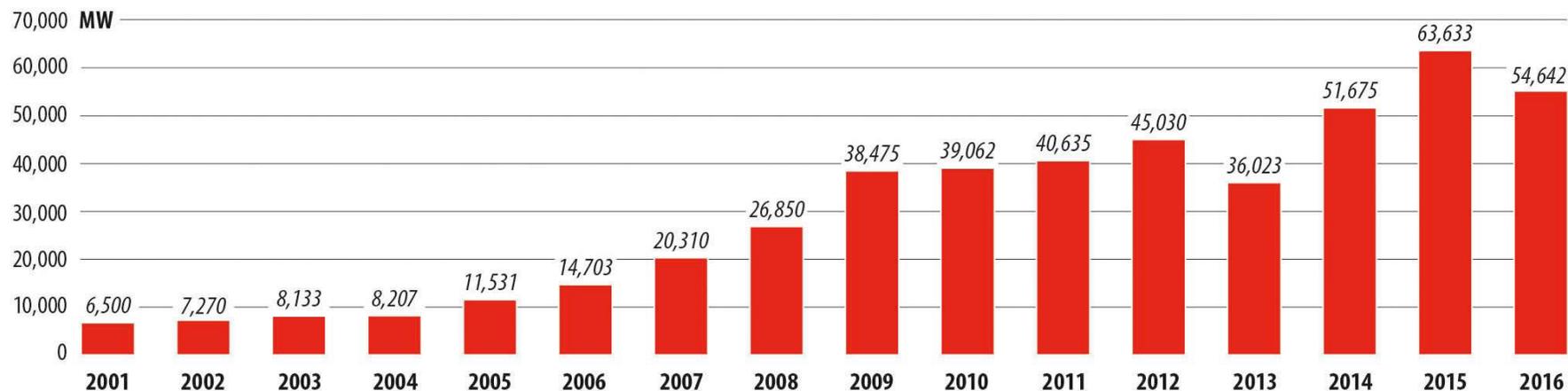
“Air Dolphin”
炭素繊維の利用
高い空力性能



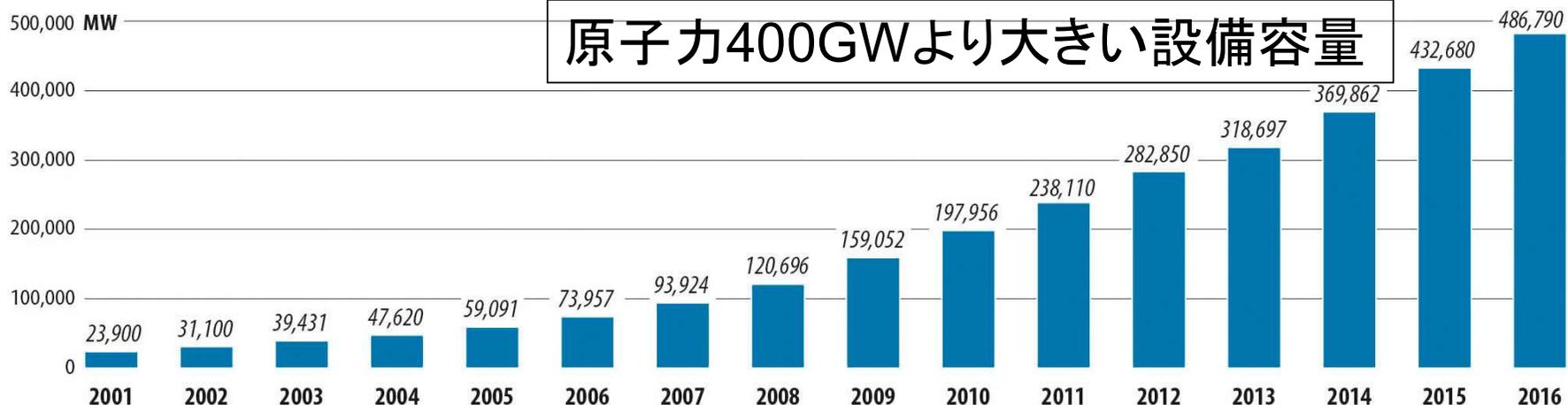
世界の新設量と風車設備容量の増加

1年で30%の増加、10年で10倍

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2016



GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2016



風力エネルギーの世界の設備容量

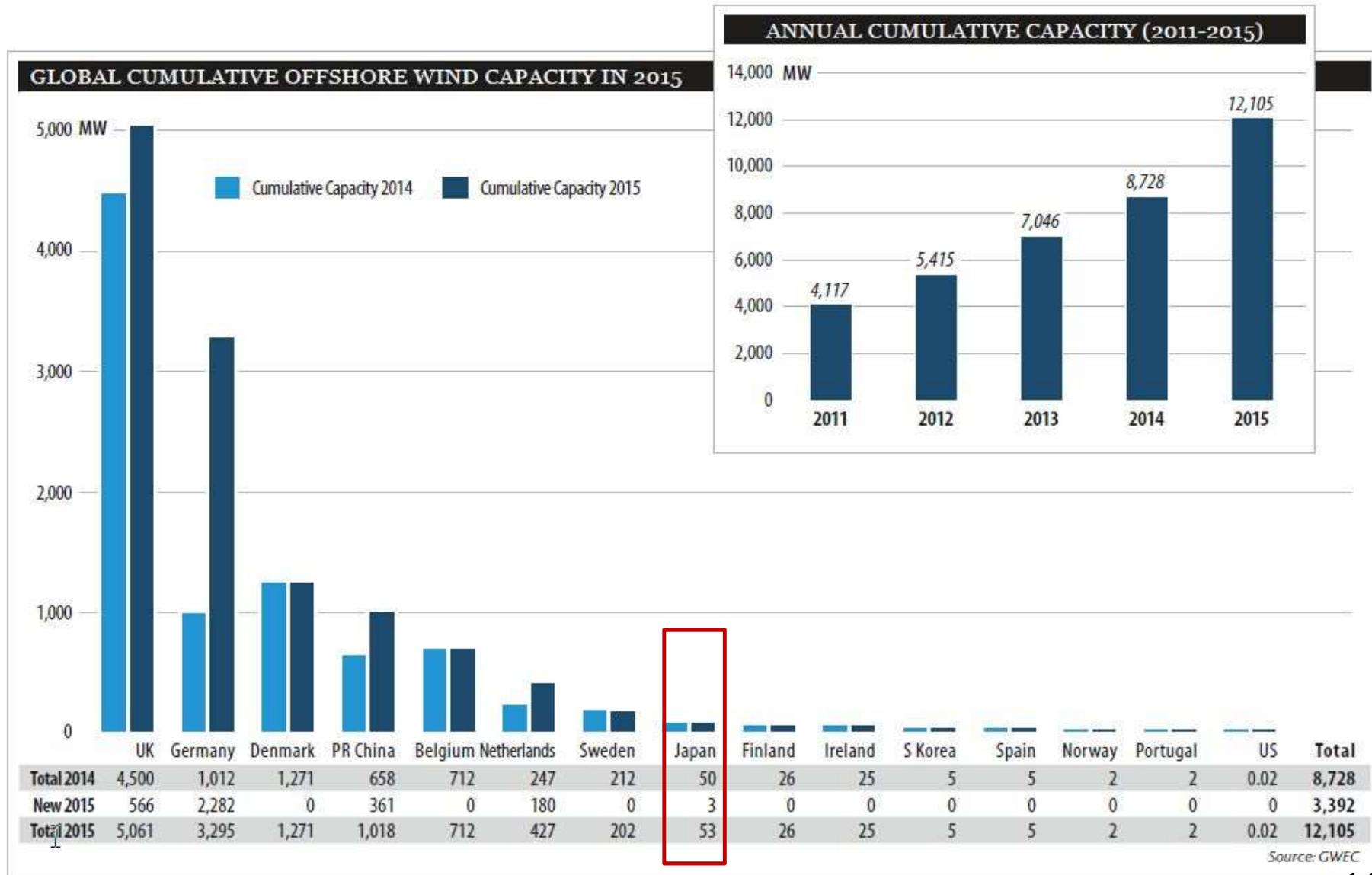
日本はトップ10に入っていない・・・3,038MW（18位？）

Position 2015	Country/Region	Total capacity end 2015** [MW]	Added capacity 2015*** [MW]	Growth rate 2015 [%]	Total capacity end 2014 [MW]
1	China	148'000	32'970	29.0	114'763
2	United States	74'347	8'598	13.1	65'754
3	Germany	45'192	4'919	11.7	40'468
4	India *	24'759	2'294	10.2	22'465
5	Spain	22'987	0	0.0	22'987
6	United Kingdom	13'614	1'174	9.4	12'440
7	Canada	11'205	1'511	15.6	9'694
8	France	10'293	997	10.7	9'296
9	Italy	8'958	295	3.4	8'663
10	Brazil	8'715	2'754	46.2	5'962
11	Sweden	6'025	615	11.1	5'425
12	Poland	5'100	1'266	33.0	3'834
13	Portugal	5'079	126	2.5	4'953
14	Denmark	5'064	217	3.7	4'883
15	Turkey	4'718	955	25.4	3'763
	Rest of the World	40'800	5'000	14.0	35'799
	Total	434'856	63'690	17.2	371'374

* by november 2015

最新情報: 486GW (2016) © WWEA - 2016

世界の洋上風車設備容量の順位



Note: Sweden and UK had decommissioning of 10MW and 6MW offshore capacity respectively
Rounding affects the final sums

日本およびアジアにおける 風車の新しいガイドライン

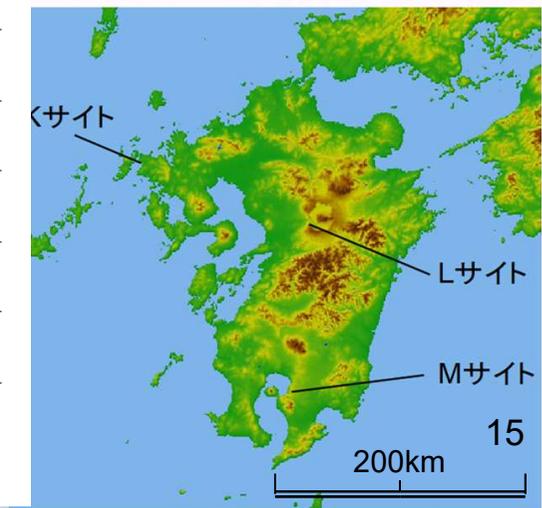
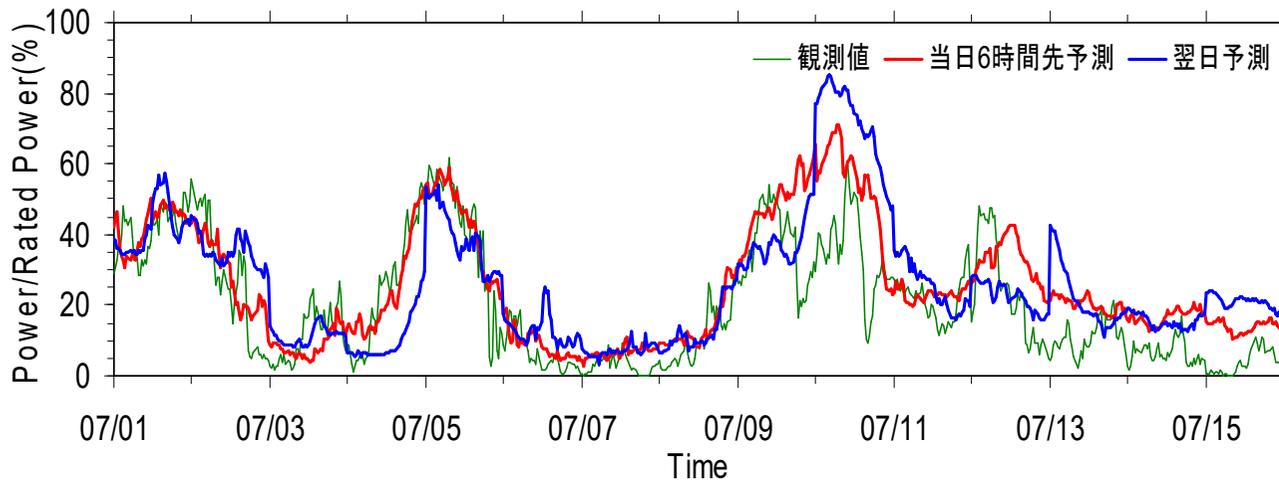
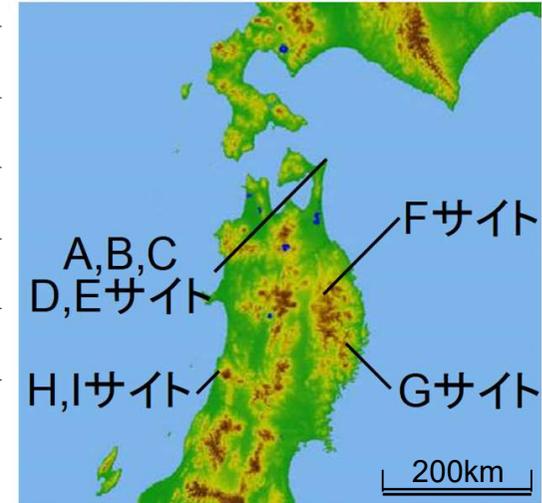
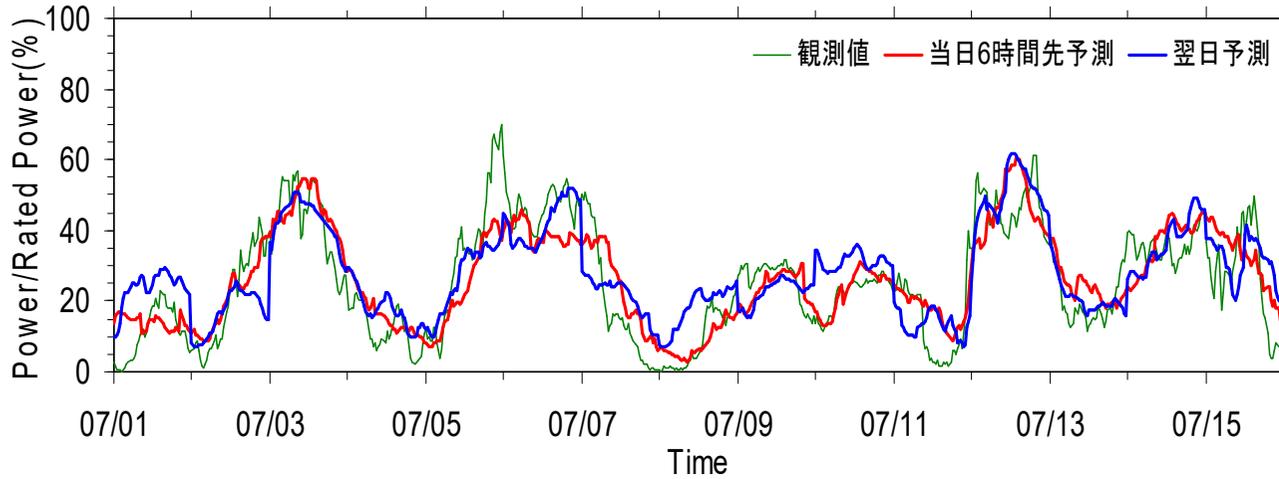
台風、乱流、冬季雷が日本の特徴

- 2003年9月11日宮古島 台風14号
- 7台全てが被災
- 当時80m/sを超える強風
- 70m/sだった世界基準を改訂
- 乱流、冬季雷の基準も対応



気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発

平均誤差10%以下、出力急変への対応などが進む



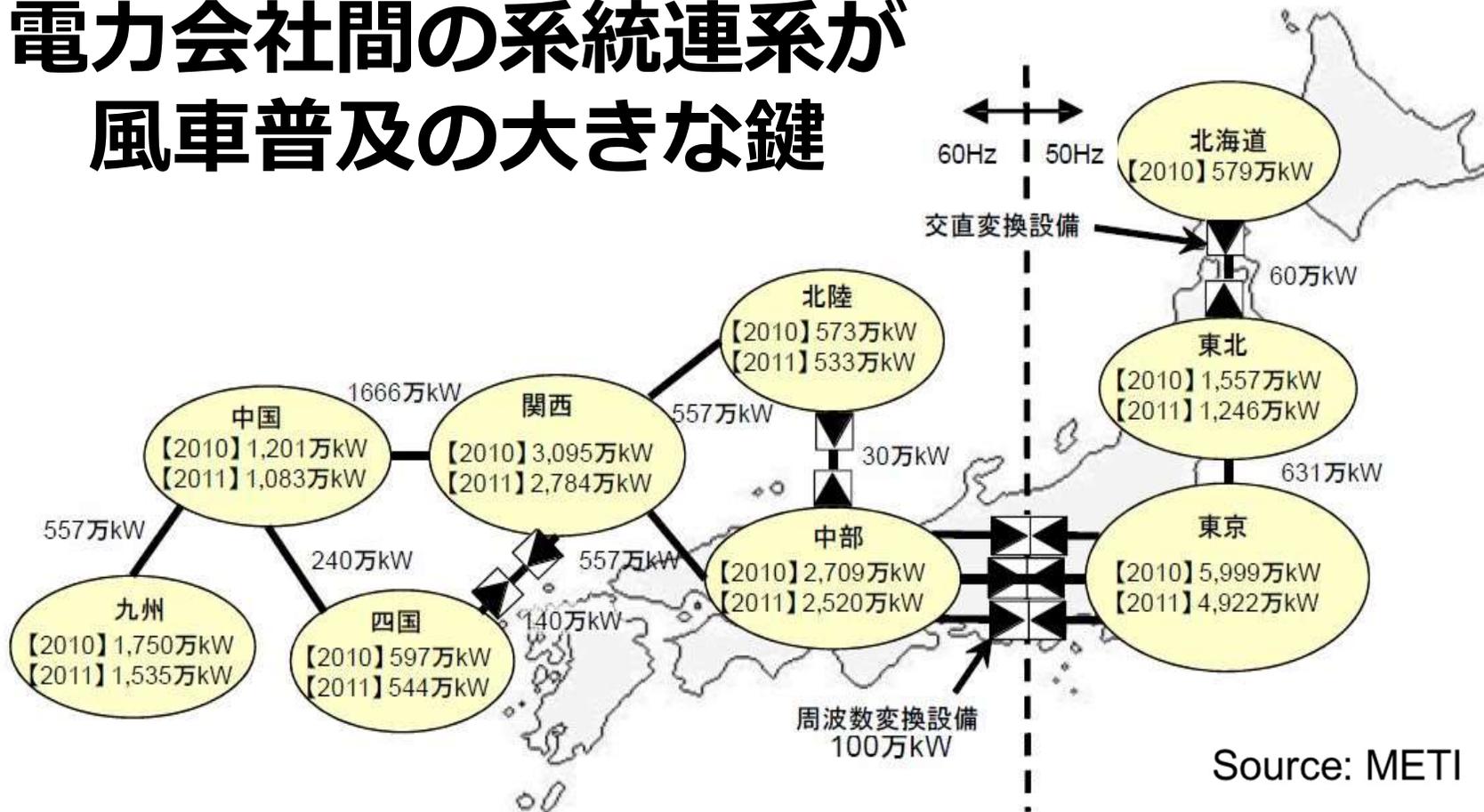
- ○ の数値は最大需要電力(H1) (北海道は冬ピークのため2010年度実績のみ記載)。
- ○ の間の線は地域間連系線等の送電容量*を表す。

* 送電容量の数値は、会社間連系設備としての設計上の送電能力を表したものの。

実際の系統運用における送電可能量(運用容量)は、設備故障を考慮した通過電流制約、安定度制約等により制約され得る。

(出所) 電力系統利用協議会、「連系線整備(建設・増強)に関する勉強会 とりまとめ報告書[資料編]」、平成19年2月より作成。

電力会社間の系統連系が 風車普及の大きな鍵



Source: METI

件名: 122% from the wind!

メッセージ Energinet, Nov 4, 00.07. Wind energy covers 122%.docx (476 KB)

Dear Colleagues,

This is a sensation.

This evening, Nov 4 2013, 00:07, the wind turbines in Denmark covers 122% of the actual demand for electricity. The share gradually has increased from 80% earlier in the evening. The quality of power is maintained.

I have for many years registered the share of wind energy when the wind was strong all over the country. The 122% is the highest ever that I registered.

You can yourself follow the map and figures at <http://www.energinet.dk/Flash/Forside/UK/index.html>. which is up-dated every 10 minutes or so.

Kind regards

Preben Maegaard

+++++

Kind regards

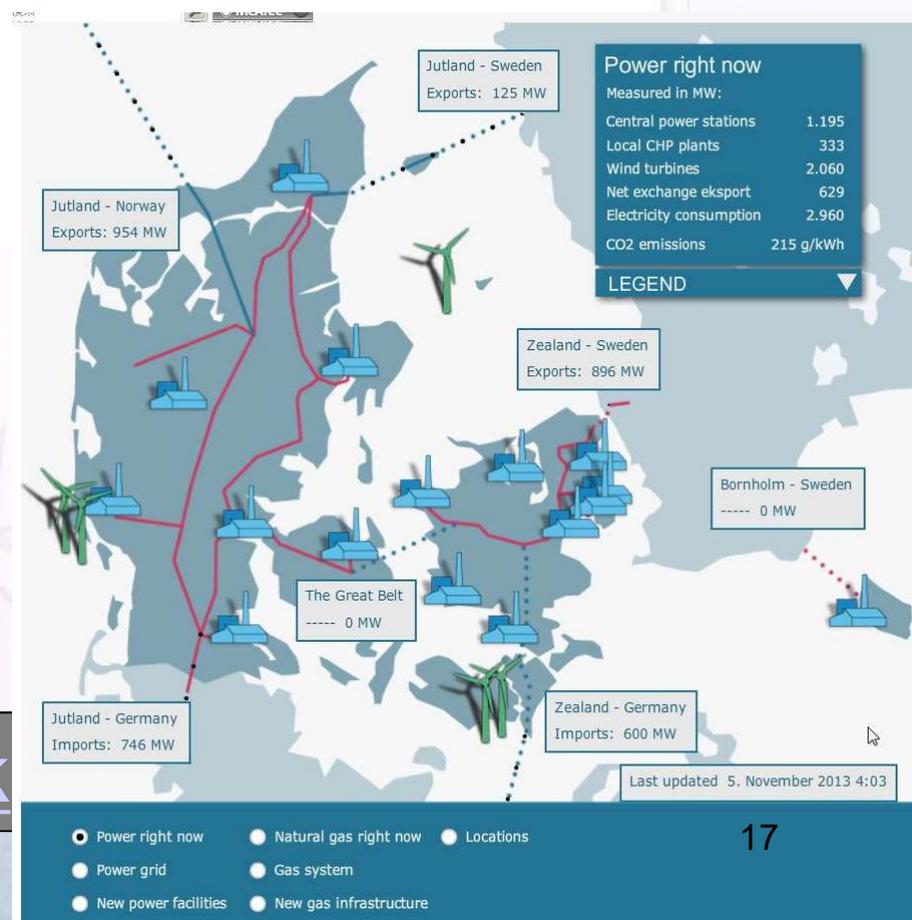
Preben Maegaard,

Director emeritus, www.maegaard.net

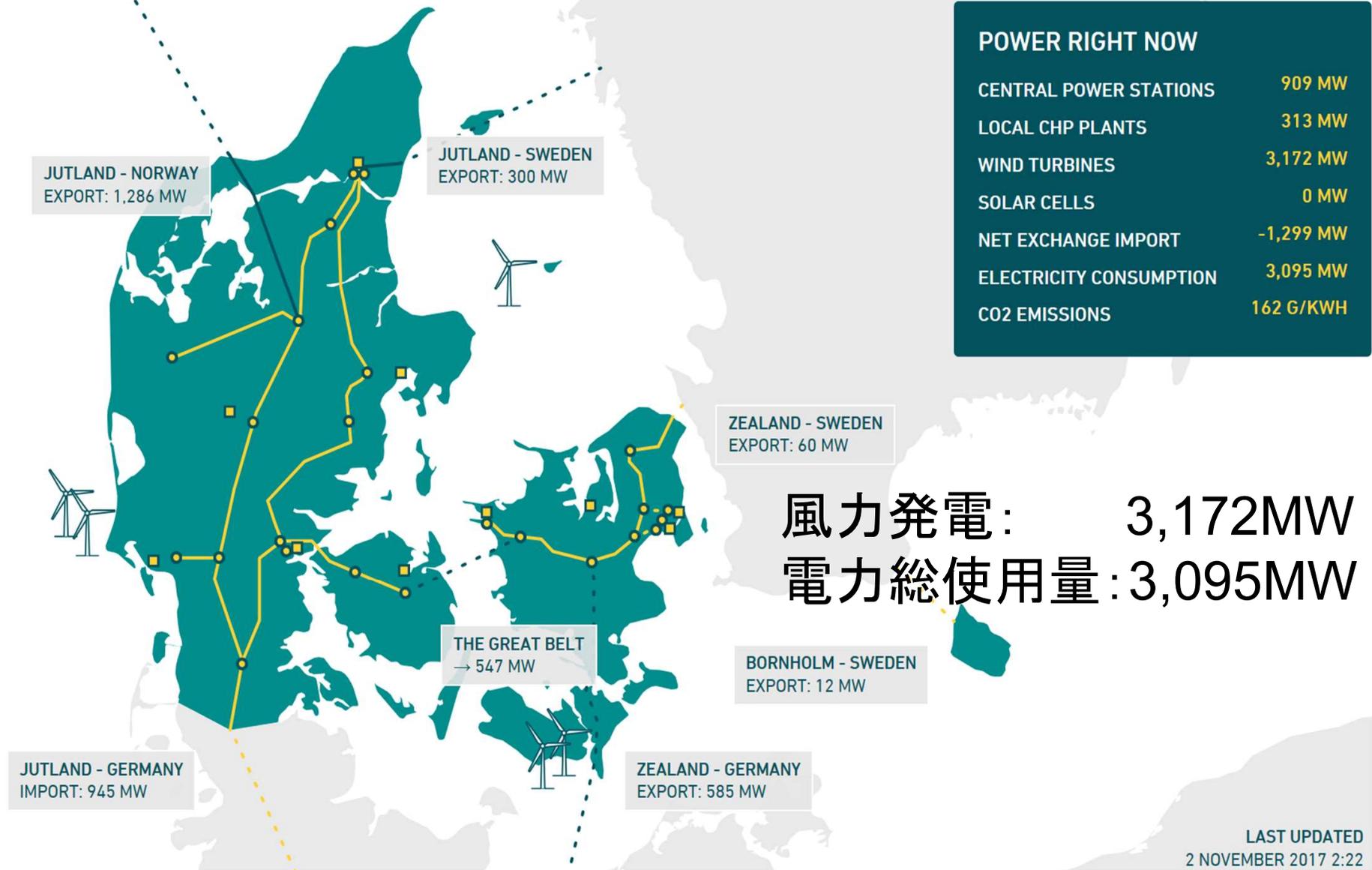
Nordic Folkecenter for Renewable Energy, www.folkecenter.net

デンマーク、風力発電 が全電力量の122% の出力を記録

<https://www.energinet.dk>



11月2日2時のデンマークの電力構成 風力発電がほぼ100%を賄っている



POWER RIGHT NOW

CENTRAL POWER STATIONS	909 MW
LOCAL CHP PLANTS	313 MW
WIND TURBINES	3,172 MW
SOLAR CELLS	0 MW
NET EXCHANGE IMPORT	-1,299 MW
ELECTRICITY CONSUMPTION	3,095 MW
CO2 EMISSIONS	162 G/KWH

風力発電: 3,172MW
電力総使用量: 3,095MW

LAST UPDATED
2 NOVEMBER 2017 2:22

風力エネルギー

—国内外の最新動向と日本の探るべき方向性—

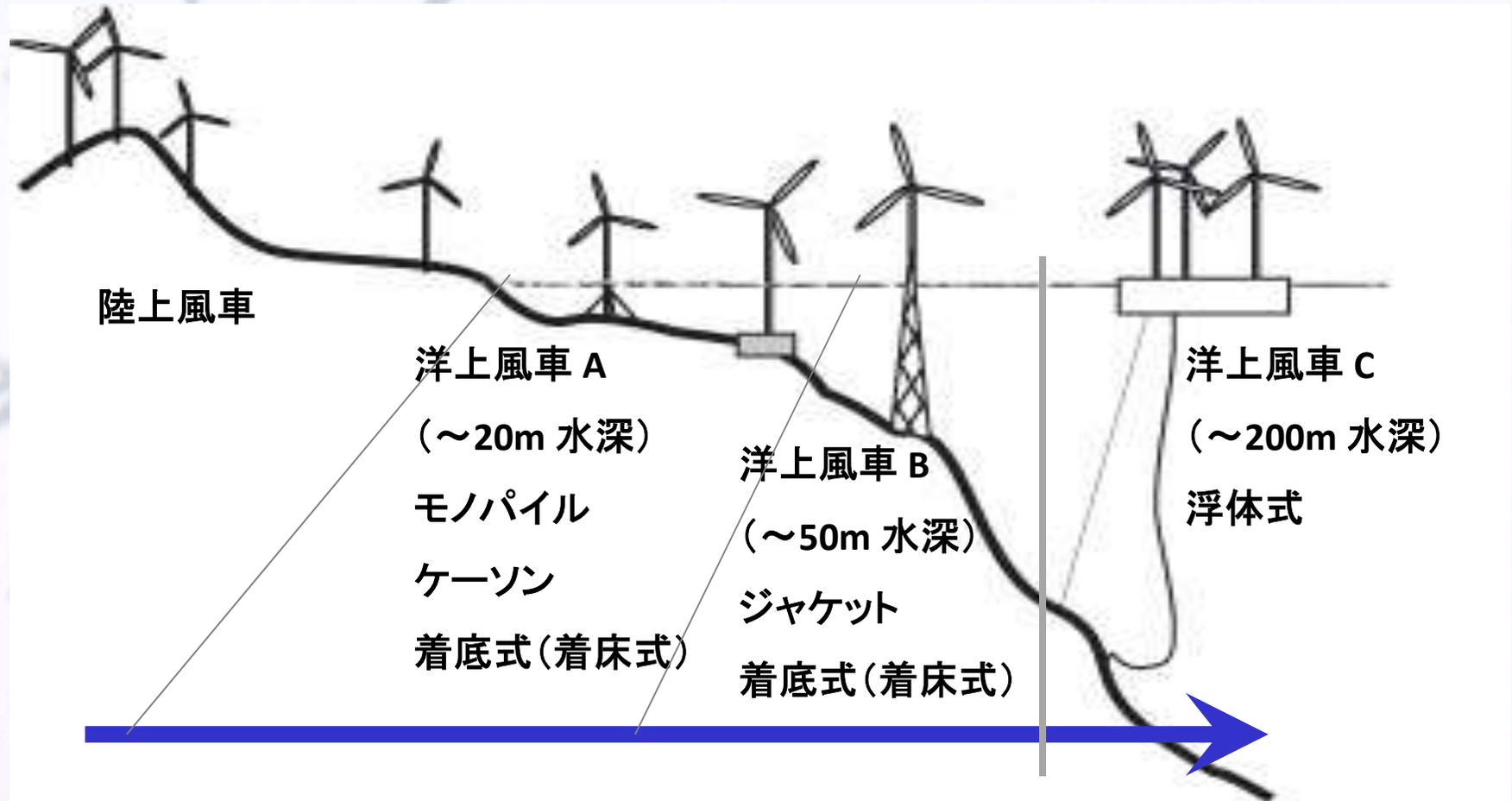
1. 風力エネルギーの研究
- 2. 日本における洋上風力プロジェクト**
3. 欧州における洋上風力プロジェクト
4. 日本の探るべき方向性
5. 結語

世界に誇る日本の洋上風車(1)

ウィンド・パワーかみす

- 震災・津波に耐える
- 翌日から送電を再開
- 世界から「津波に耐えた風車」
として広く知られる
- 災害時の再生可能エネルギーの
重要性を認識させる

洋上風車の概念図



陸上風車

洋上風車 A

(~20m 水深)

モノパイル

ケーソン

着底式(着床式)

洋上風車 B

(~50m 水深)

ジャケット

着底式(着床式)

洋上風車 C

(~200m 水深)

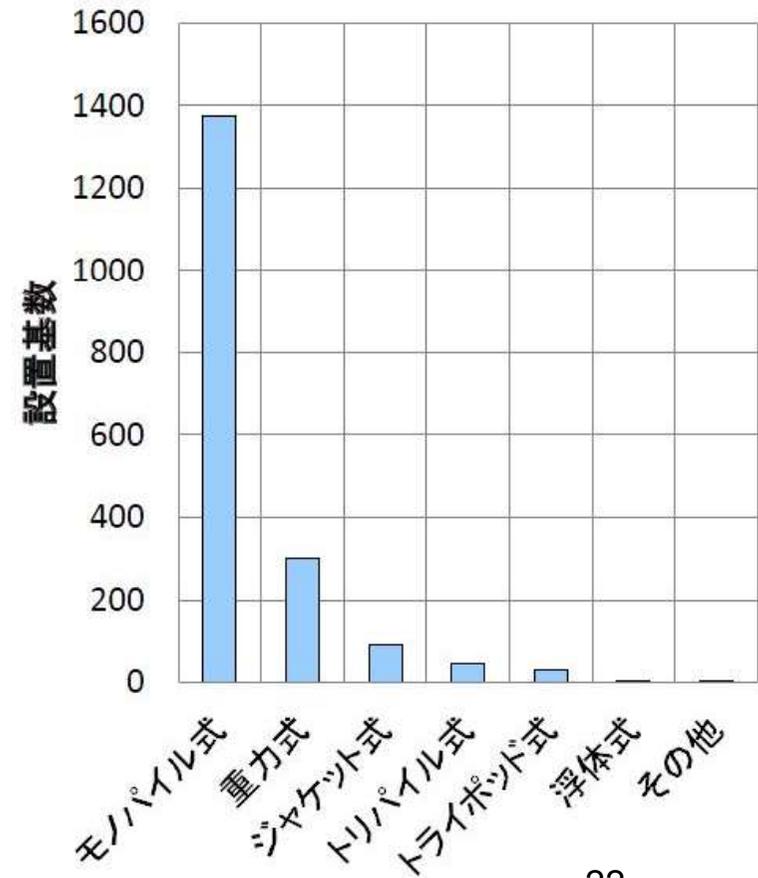
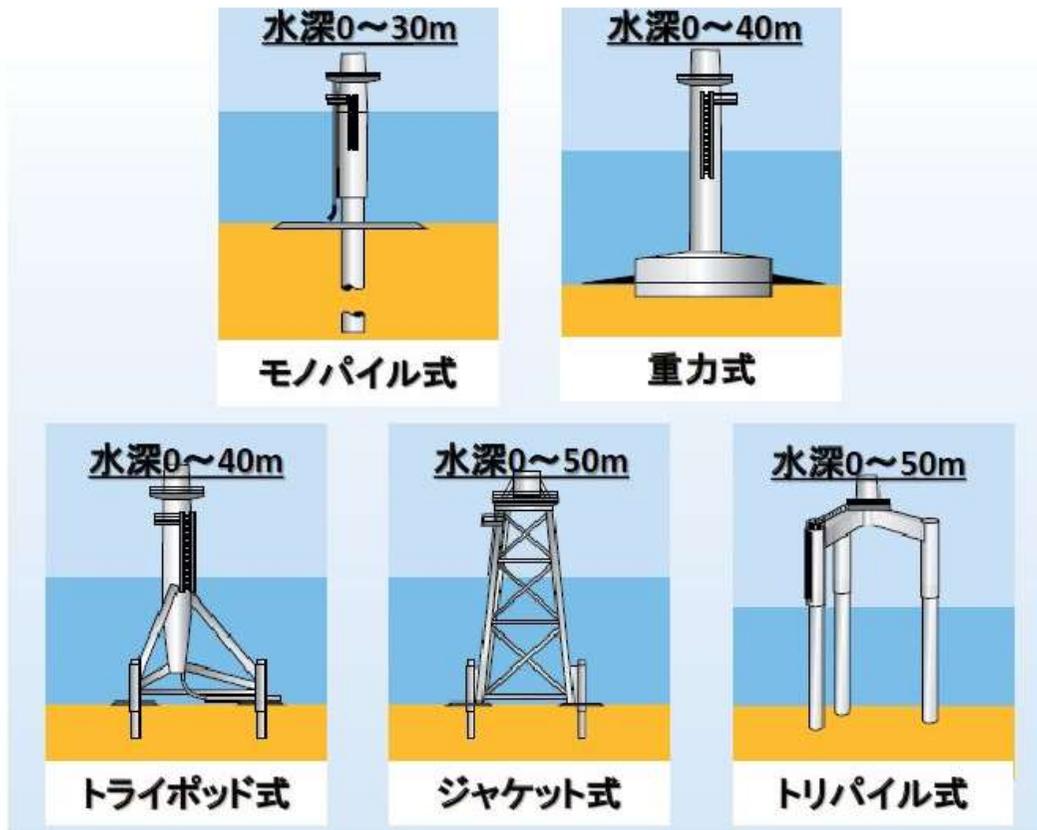
浮体式

現在の商業運転

将来の洋上風車

洋上風力発電の導入実績(欧州)

- モノパイルが中心(水深～30m、風車出力:～3.6MW)
- 大型風車や大水深対応として、重力式やジャケット式等を適用



出典: EWEA "Deep Water" (2013)

2012年末における導入実績
(基礎比較)

世界に誇る日本の洋上風車(2)

NEDO 千葉県銚子沖 2012



- 東電を主体、MHI-2.4MW
- 風況観測塔

世界に誇る日本の洋上風車(3)

NEDO 北九州市 2013



- J-POWERを主体、JSW-2MW
- 風況観測塔

世界に誇る日本の浮体式洋上風車(1)

環境省 長崎県五島 2012, 2013

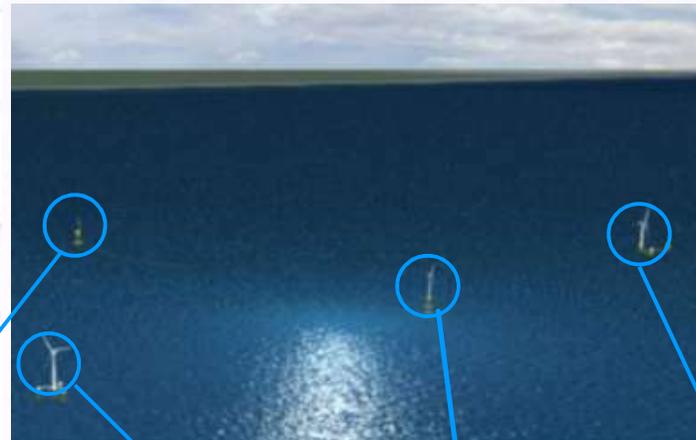
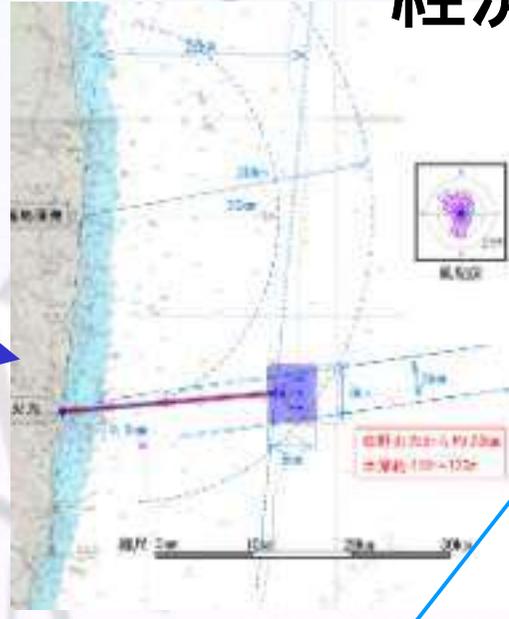
Source; MOE Project consortium



- 戸田建設・九州大学を主体、SUBARU-100kW, HITACHI-2MW
- 風況観測塔

世界に誇る日本の浮体式洋上風車(2)

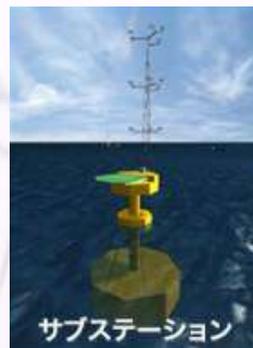
経済産業省 福島PJ



Project Consortium: 11 members

- Marubeni (Project integrator)
- MHI
- University of Tokyo
- Mitsubishi Corp.
- IHI Marine United
- MES
- Nippon Steel
- Hitachi
- Furukawa Electric
- Shimizu Corp.
- Mizuho Information & Research

2013



**Hitachi
JMU Spar**

2013



**Hitachi 2MW
Mitsui semi-sub**

2014



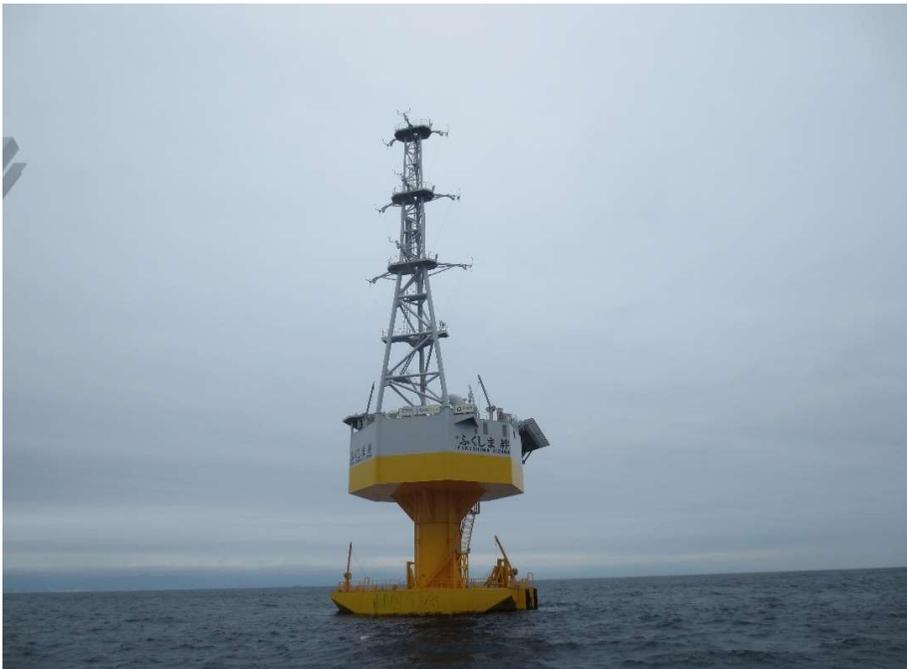
**MHI 7MW
JMU Spar**

2014



**MHI 7MW
MHI semi-sub**

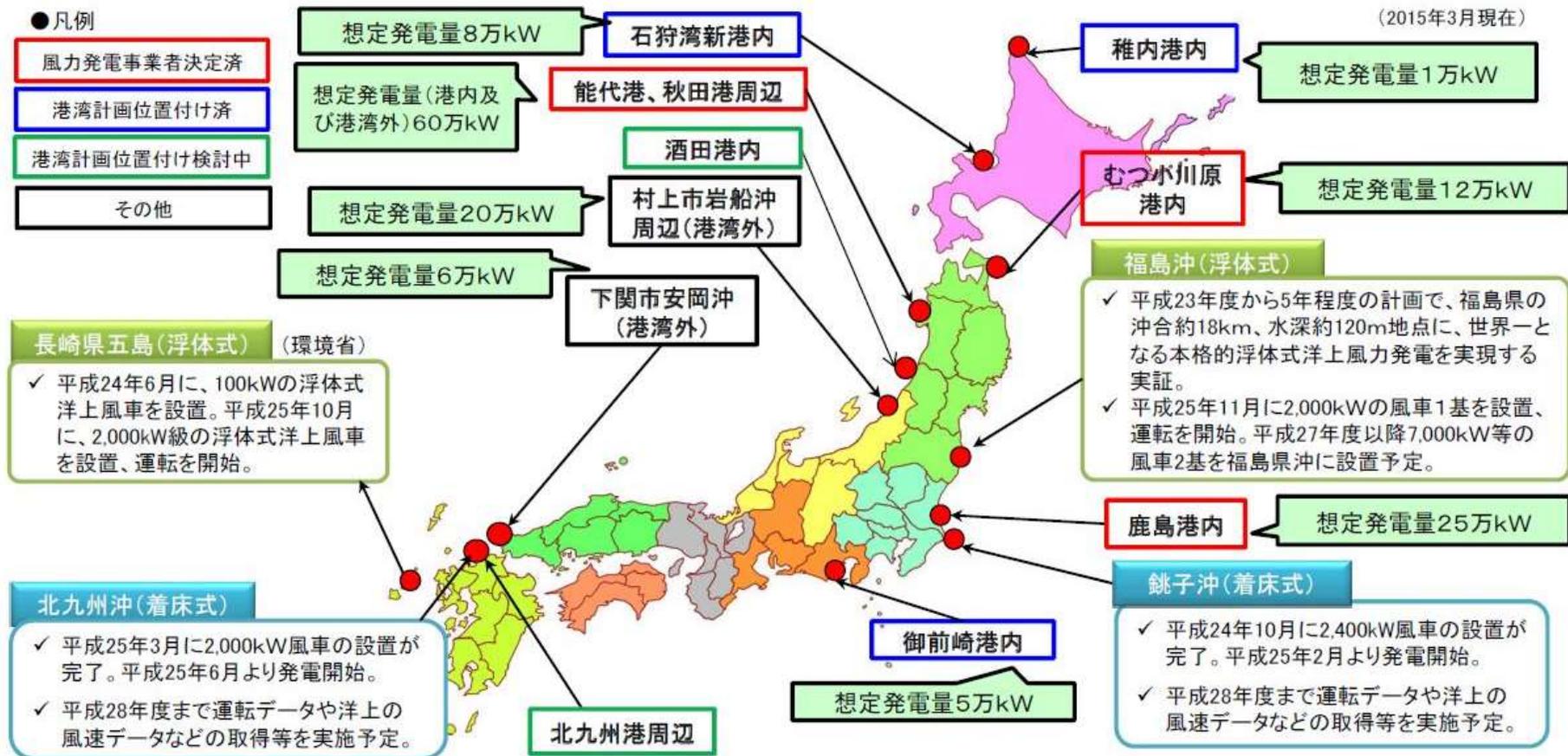
Source; Fukushima offshore wind consortium



福島 浮体式洋上風車
筆者撮影(2017年7月)

国内の洋上ウィンドファームの計画

- 洋上風力の導入は、陸上風力のポテンシャルが限定的な我が国において、風力発電の導入拡大を図る上で不可欠。
- 着床式(風車を海底に固定して設置する方式)の洋上風力については、国・NEDOが銚子沖と北九州沖の二か所で実証事業を行い、実証機の設置を終了。民間の事業化計画も徐々に始動。
- 浮体式(風車を海底に係留して設置する方式)については、世界初となる本格事業化を視野に入れた福島県沖、及び長崎県五島沖で実証開始。
- 昨年12月、むつ小川原港、能代港及び秋田港の港湾管理者が、港湾法上の港湾計画に「再生可能エネルギー源を活用する区域」を位置づけるとともに、その後の公募により発電事業者を決定するなど、洋上風力発電の導入手続きが着実に進んでいる。



風力エネルギー

—国内外の最新動向と日本の探るべき方向性—

1. 風力エネルギーの研究
2. 日本における洋上風力プロジェクト
- 3. 欧州における洋上風力プロジェクト**
4. 日本の探るべき方向性
5. 結語

世界最大の洋上風車 ロンドン・アレイ 175基、630MW



<http://www.londonarray.com/> より

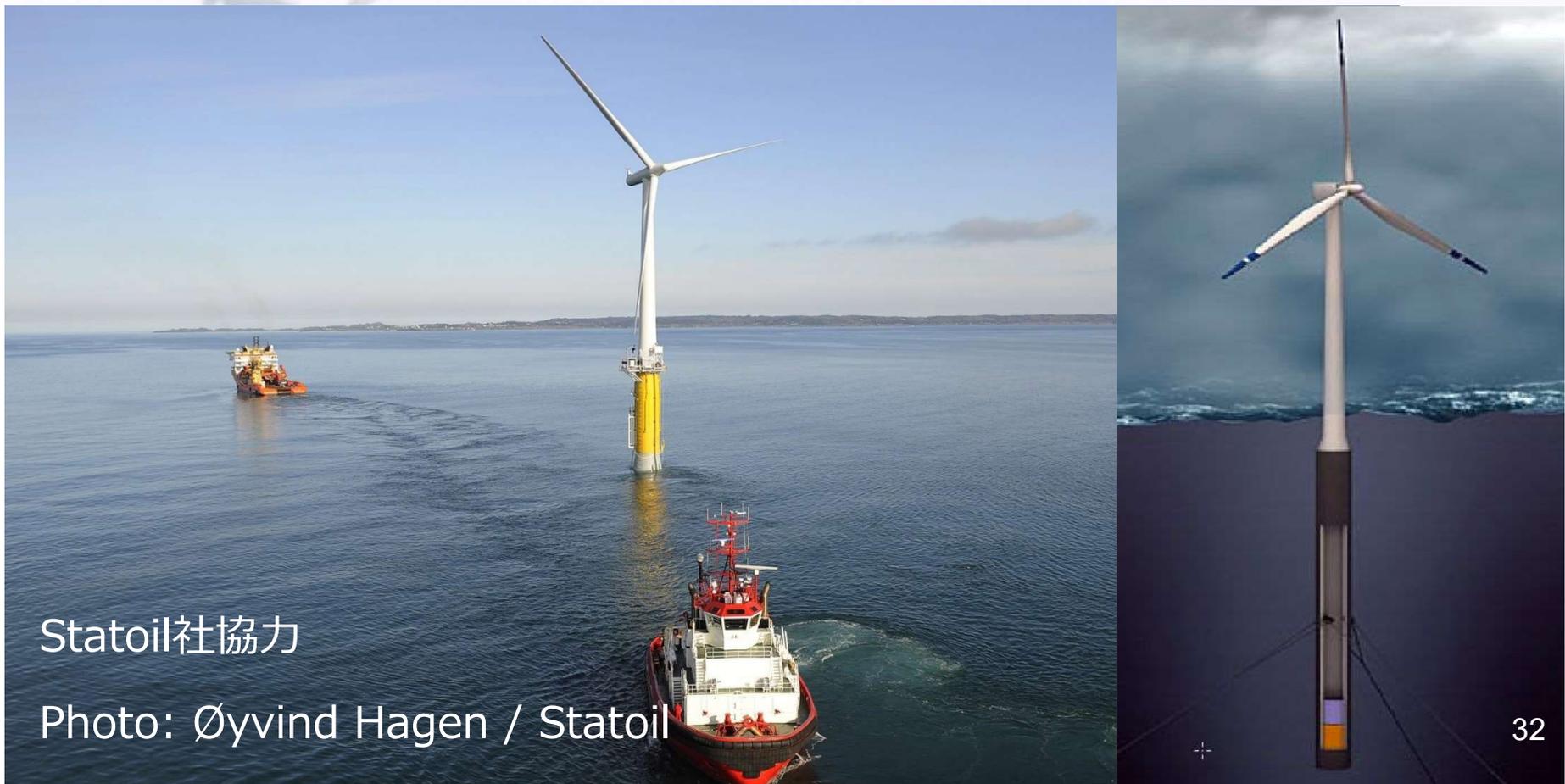
デンマーク ホーンズ・レフ洋上風車の後流

1) 80基、160MW, 2) 91基、209MW



海外の浮体式洋上風車(1)

ノルウェー Hywind 挑戦的な浮体式洋上風車(2009年)
水深 200m (120-700m) , 100mの浮体構造, 2.3 MW風車



Statoil社協力

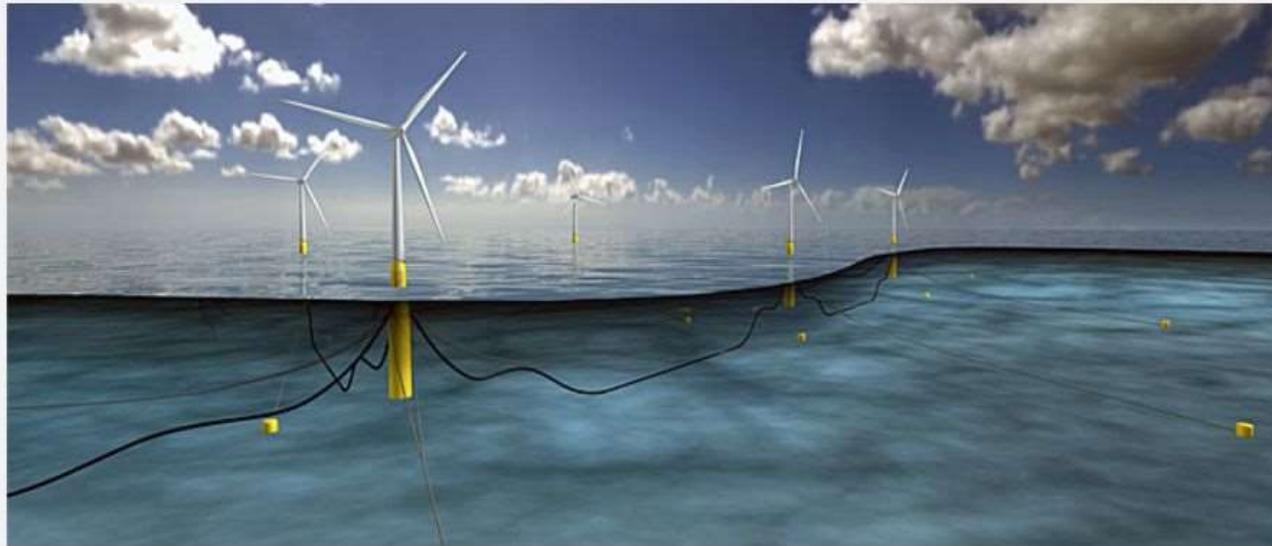
Photo: Øyvind Hagen / Statoil

Hywind つづき (2017)

Hywind Scotland Pilot Park

Source: STATOIL Website

Statoil plan to build the first floating wind farm off the Scottish coast. The park will be located near Buchan Deep, approx. 25-30 km off the coast of Peterhead in Aberdeenshire.



The 30 MW pilot project will consist of five, 6 MW floating turbines operating in waters exceeding 100m of depth. The Pilot Park objectives is to demonstrate cost efficient and low risk solutions for commercial scale parks.

The technology that will be used in the pilot project has been tested with excellent results in a demonstration project off the coast of Norway.

Floating wind represents a new and significant renewable energy source that will complement an existing and expanding array of alternative energy projects in Scotland.

This pilot project is expected to demonstrate the feasibility of multiple floating wind turbines in a region that has optimal wind conditions, a strong supply chain within oil and gas and supportive public policies such as enhanced support for floating offshore wind pilot parks under the Renewables Obligation (Scotland).

Hywind つづき

Hywind Scotland の最新情報



WIND POWER OFFSHORE

<http://www.windpoweroffshore.com/article/1437693/hywind-turbines-complete-foundation-installation> 26 June 2017

offshoreWIND.viz All Hywind Scotland Floating Turbines Now In Place

<http://www.offshorewind.biz/2017/08/16/all-hywind-scotland-floating-turbines-now-in-place/>

より転載

海外の浮体式洋上風車(2)

ideol FLOATGEN プロジェクト

Contact us | Newsletter | Recruitment   

Source: Ideol HP

ABOUT IDEOL / OFFSHORE FLOATING WIND / IDEOL INNOVATION / PROJECTS / NEWS / PRESS

Home » Projects » Japan project

JAPAN PROJECT

Capacity :
7.5 MW (two demonstrators)

Installation site :
Japan

Water depth :
50 to 100 metres

For Japan, a country in the throes of redefining its energy mix following the Fukushima disaster, the construction and installation of floating wind farms is becoming a strategic requirement. Reducing the cost of floating technology by 2020 is one of the priorities of Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). The signing of the partnership agreement between Hitz and Ideol reflects this dynamic. In this regard, NEDO has launched a call for tenders to test different floating technologies.



Objectives :

To validate a floating technology with a view to equipping future commercial farms installed by 2020 (Tokyo Olympic Games).

Ideol's scope of work :

The NEDO consortium has been built around Ideol's floating technology, cost-cutting technologies. Within the context of this project, Ideol is responsible for the design and engineering of the foundation as well as the subsequent construction of two demonstrators, one in steel and the other in concrete.

Schedule :

- ▶ Design studies: 2015-2016
- ▶ Commissioning : 2016-2017

Perspectives :

This project confirms **Ideol's potential to significantly reduce the costs** of offshore wind turbines as well as confirming the **performance of its technology under the most demanding of weather conditions** (typhoons).

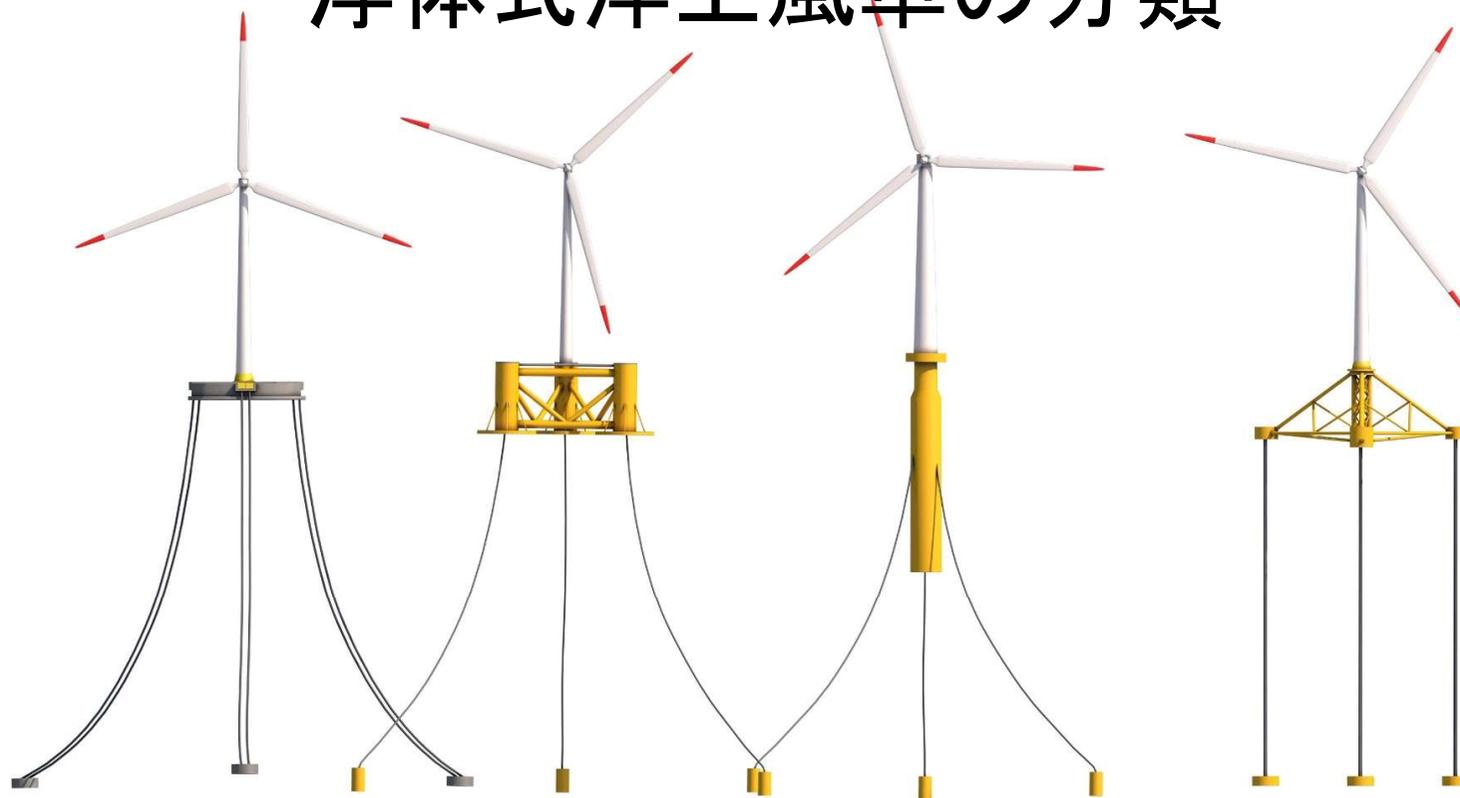


PROJECT PARTNERS

Hitz
Hitachi Zosen

FLOATGEN 見学ツアー (1)

浮体式洋上風車の分類



バージ型

セミサブ型

スパー型

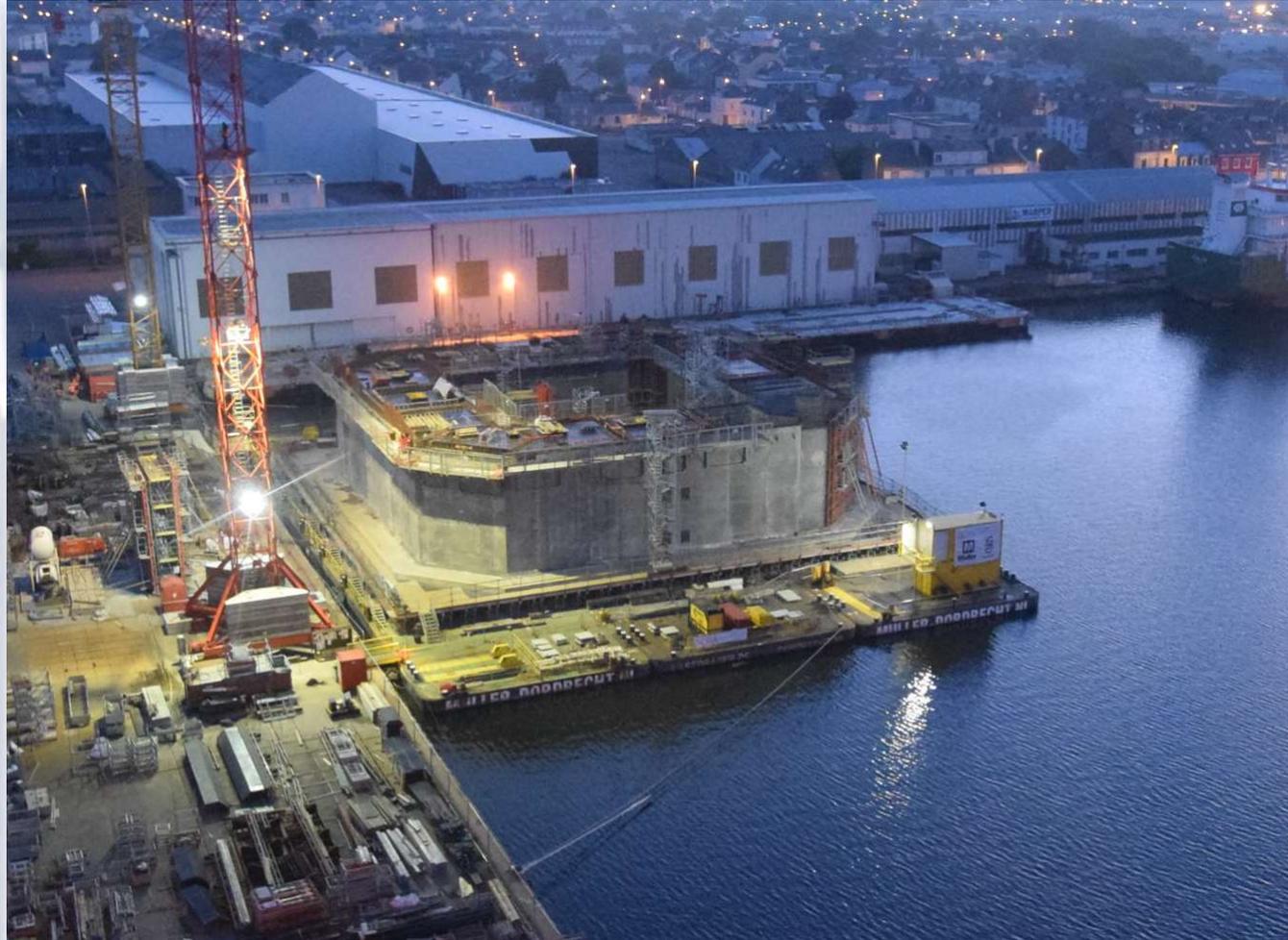
TLP係留

FLOATGEN

NEZZY

HYWIND

FLOATGEN 見学ツアー (2)



サン・ナザール港 地域の港で製造可能

IDEOL 山田睦氏提供 ³⁷

FLOATGEN 見学ツアー (3)



FLOATGEN 見学ツアー (4)



コンクリート浮体で低廉なシステムへ

39

IDEOL 山田睦氏提供

FLOATGEN 見学ツアー (6)

FLOATGENプロジェクト



完成予定図

【Floatgenプロジェクト】

フランスの大西洋側、サン・ナゼールという港町の沖22km（水深32m）の地点で計画されている、フランス初の洋上風力プロジェクトです。浮体のサイズは36m x 36m。

IDEOLがプロジェクトコーディネーターを務め、エコール・セントラル・ナント校、ブイグ（フランスの大手ゼネコン）、シュトゥットガルト大学などが共同体を組み、欧州連合実証実験プロジェクトを推進しています。各国からの注目は高く、日本からも2017年3月に30人以上の視察団が訪問。



<http://floatgen.eu/en/live>

IDEOL 山田睦氏提供 40



Offshore wind energy 2017, London

Offshore wind energy 2017 (1)

- Renewable UK と Europe Wind の共催
- ロンドン、6月6日から8日、5,000人の参加者
ロンドン橋のテロ直後の開催
- 開会式における基調講演の要旨
 - ✓ 現在、EUの洋上風力は13GW（日本の風力3GW）
 - ✓ EUの電力の25%を洋上風力で賄い得る
 - ✓ 2030年までの目標として 7–11%, 60–86GW
 - ✓ 価格は €51/MWh (6.1円/kWh) に低下（日本は36円）
 - ✓ 毎年の新規導入量 4GW は産業界にとって重要
 - ✓ “North Sea”（北海）は “Silicon Valley”（シリコンバレー）

Offshore wind energy 2017 (2)

- MHI-Vestas が V164-9.5MWの風車を発表
- 1個の洋上風車が英国8300所帯の電力を賄う
- V164-8.0MW（直径160m）を改良して9.5MWへ
- 実証されている技術を利用する
- すぐに提供！
- パンフレットはない・・・
- Dong が13-15MW機に言及
補助金なしでの運用
1 GW超のファーム大型化
徹底したコスト削減



Offshore wind energy 2017 (3)

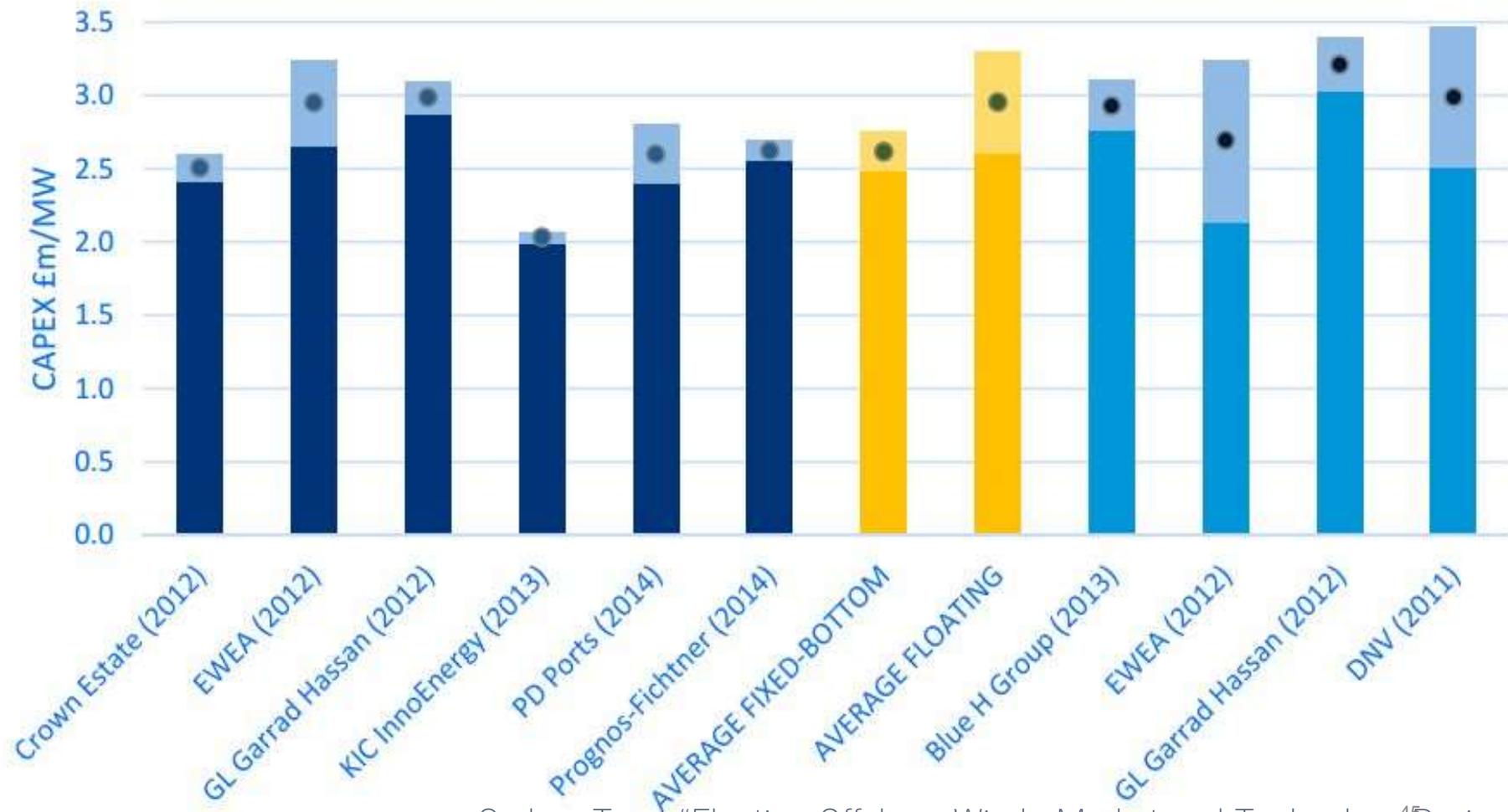
浮体式洋上風力のセッションの議論

- 着底式に限る事業者と浮体式に積極的な業者に分かれる。
例えば、Dong Energyは着底に主力を置く。Statoil, IDEOL, MECHAL, Siemens/Gamesa は浮体に熱心
- 風の強い地域に浮体を配置することにより経済性を強化
- コンクリート、繊維索、TLP（緊張係留）の新技术の導入
- 寿命は20年から30年へ延長
- 浮体式洋上ファームとしては20-25本の単位へ
- 2025年に浮体式洋上風車は商業化へ
- どの地域？
 - JAPAN, TAIWAN, UK, FRANCE, JAPAN
 - 日本の注目度が高い

浮体式と着底式の初期コスト (CAPEX) の比較

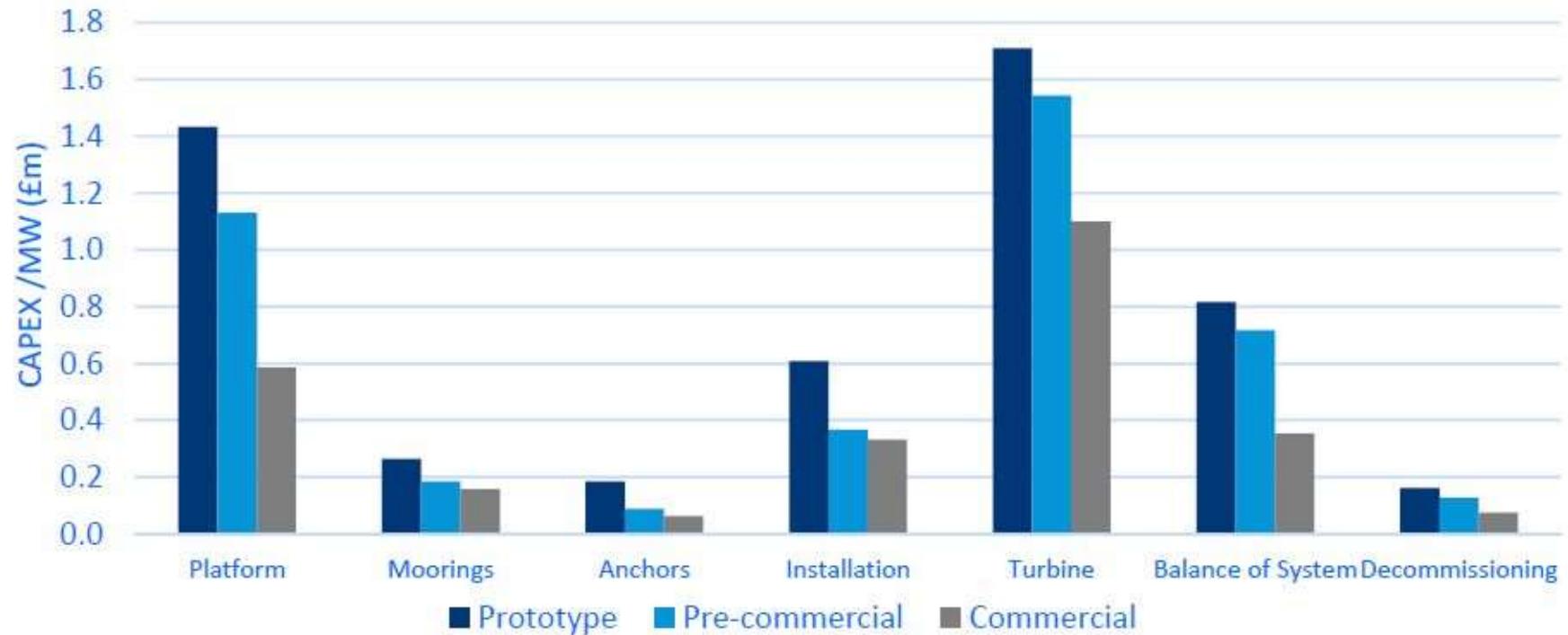
45m以上の水深において (1 £ m/MW ≐ 14万円 / kW)

Figure 2.7.3. CAPEX estimates for fixed-bottom and floating wind



浮体式洋上風力の将来のコスト削減

Figure 3.5.5. CAPEX breakdown by component for different deployment scales



海外の浮体式洋上風車(3)

新しい浮体式洋上風力の提案
2枚翼、タレット、ワイヤの採用

SCD[®] nezzy 8.0 MW

New revolutionary floating solution
reduces the costs by 40% due to:

- concrete foundation design
- guided leaning profiled tower
- self-adjusting downwind rotor
- stabilised by 3 flexible floaters
- installation without crane ships

海外の浮体式洋上風車(4)

縦軸風車, Vertiwind

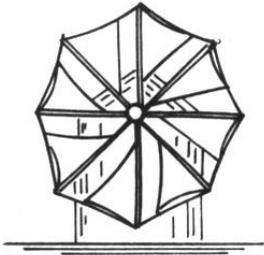
重心が低く、浮体式洋上風力への導入が容易



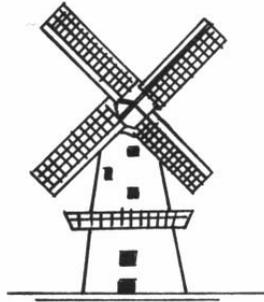
NENUPHAR
OFFSHORE WIND TURBINES

NENUPHAR – the next generation offshore wind turbines

水平軸風車と垂直軸風車



セルウィング型風車
(ギリシャ風車)



オランダ風車



多翼型風車



1枚ブレード

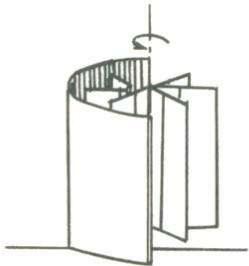


2枚ブレード

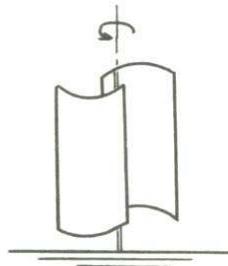


3枚ブレード

プロペラ型風車



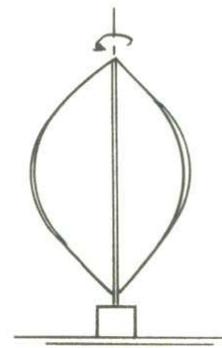
パドル風車



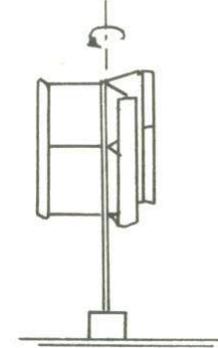
サボニウス風車



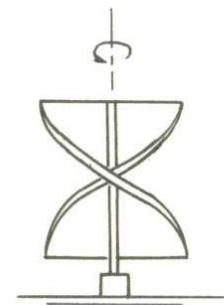
クロスフロー風車



ダリウス風車



真直ダリウス

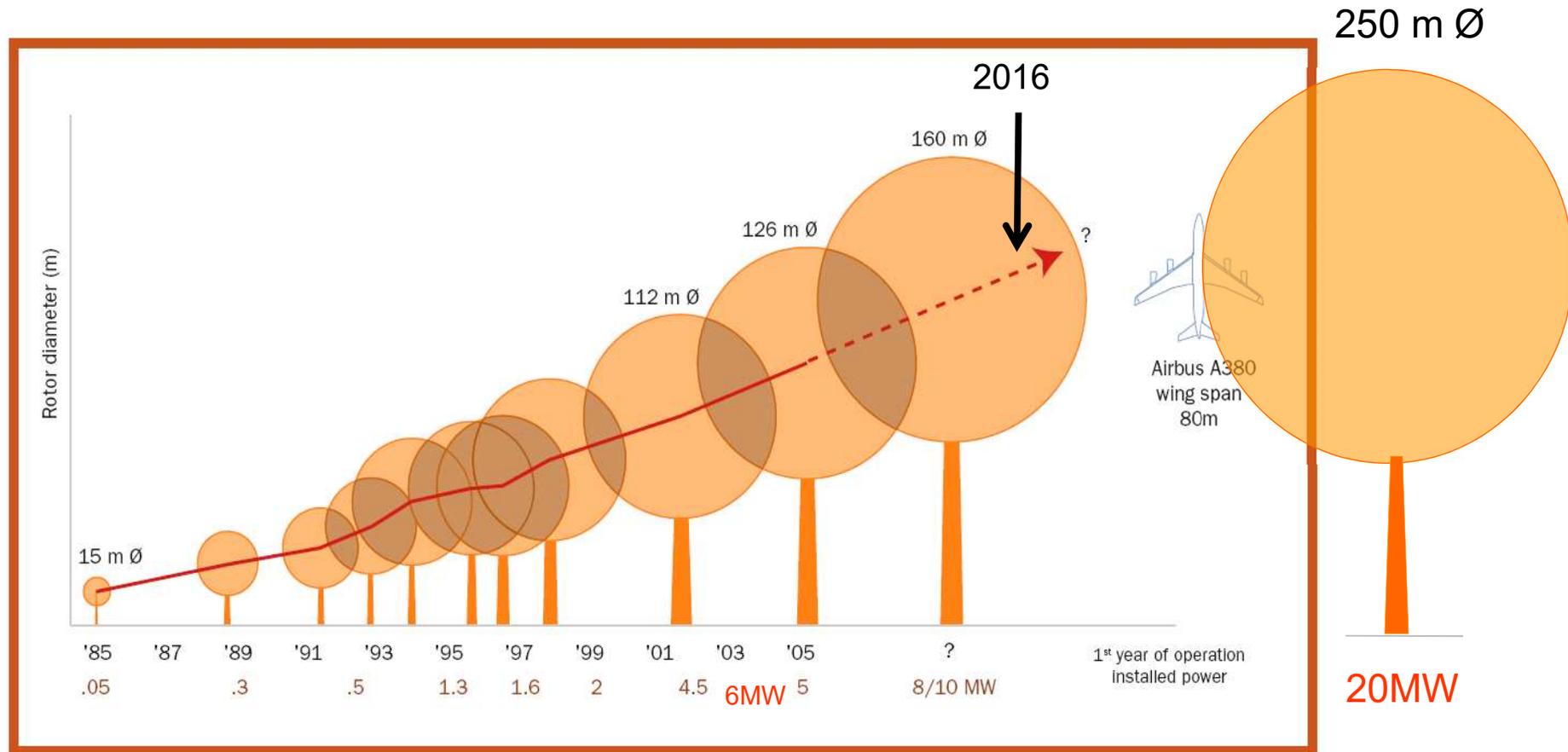


ヘリックスタービン
(ひねりダリウス)

垂直軸型風車

風車の大型化

大型化→風車中心の位置が高い→風が強い→風速の3乗に比例する出力が大→発電単価が小さい

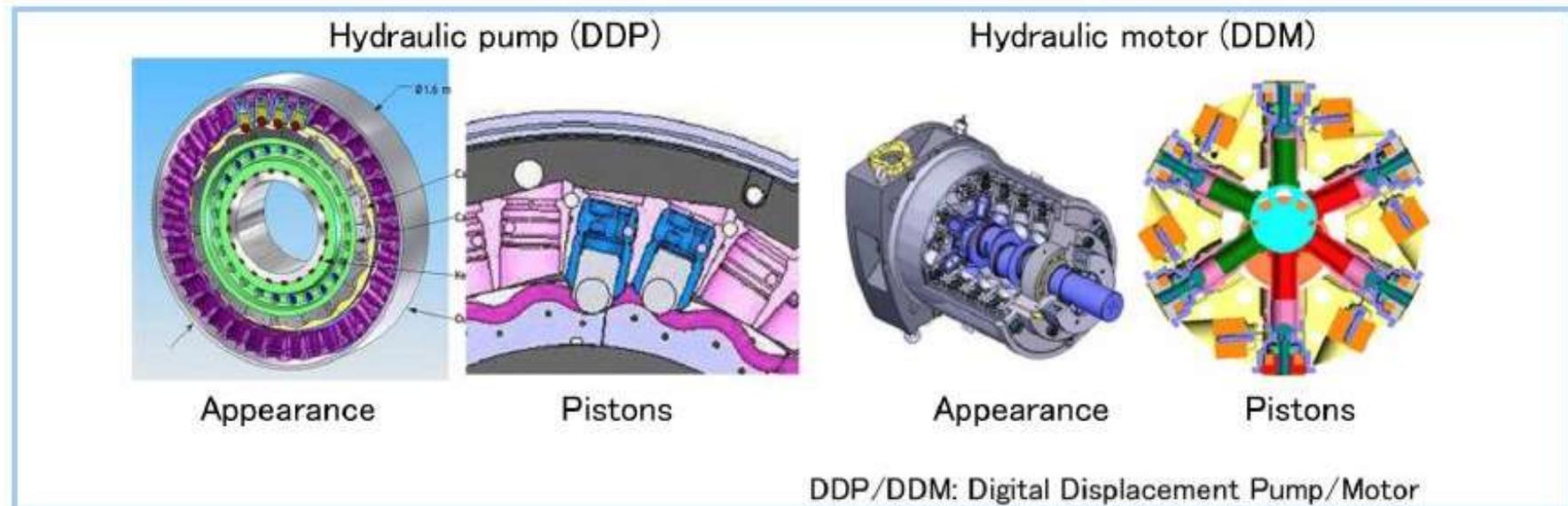
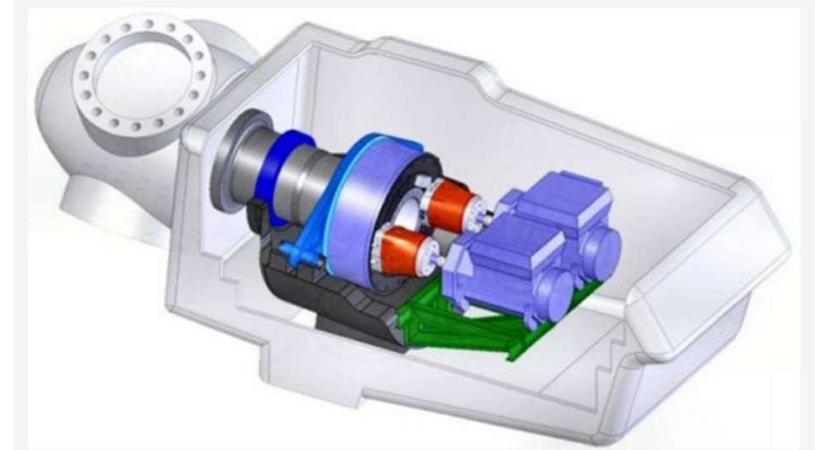


EWEC08, Brussels.
DOE, Annual Report , May 2008.

洋上風力に向けた超大型風車の最新技術 油圧を利用したギアレスのドライブトレイン

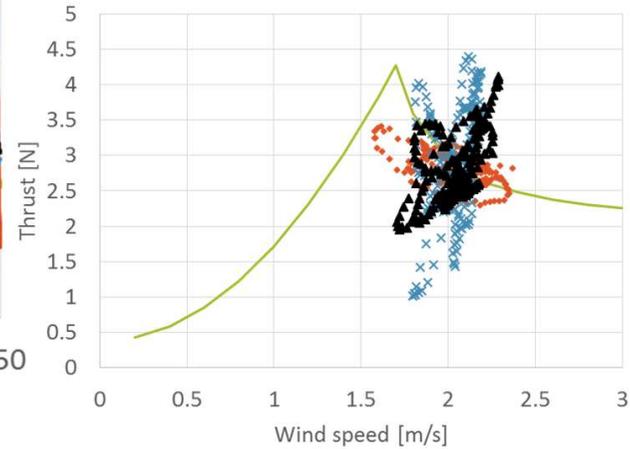
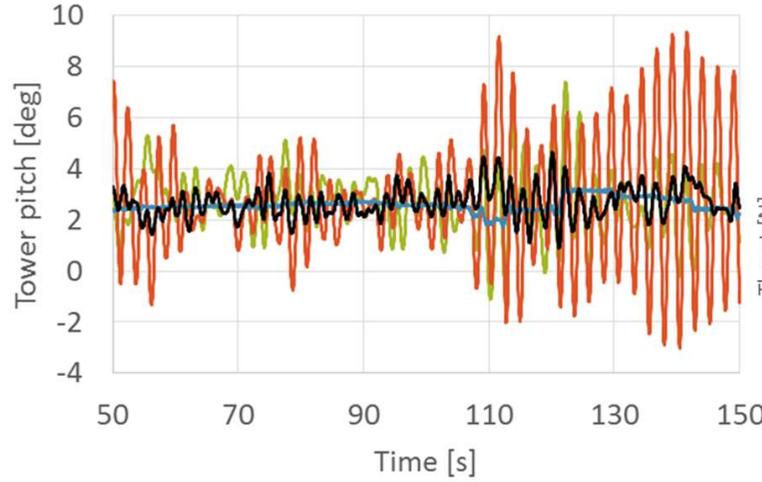
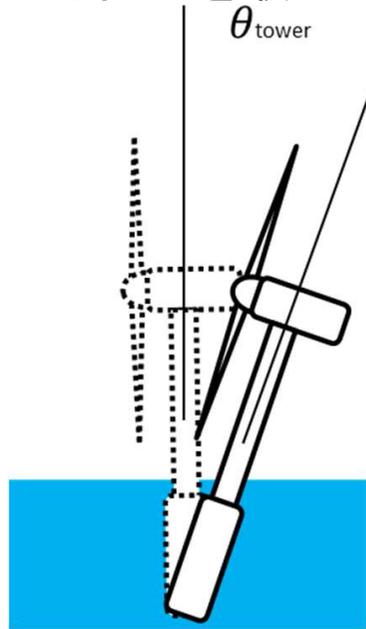
- 1) 小さなユニットの油圧機器の組み合わせ
- 2) 軽量発電機を利用可能
- 3) 将来の大容量への発展が容易

将来、超電導発電機との競争(?)



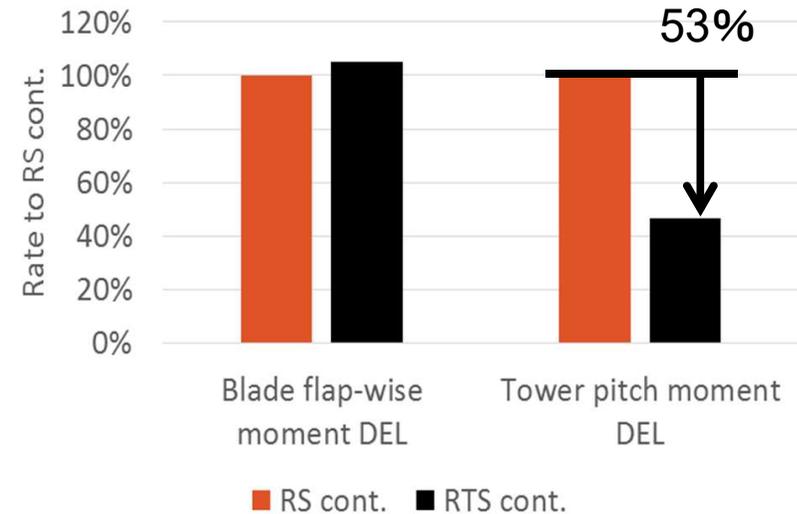
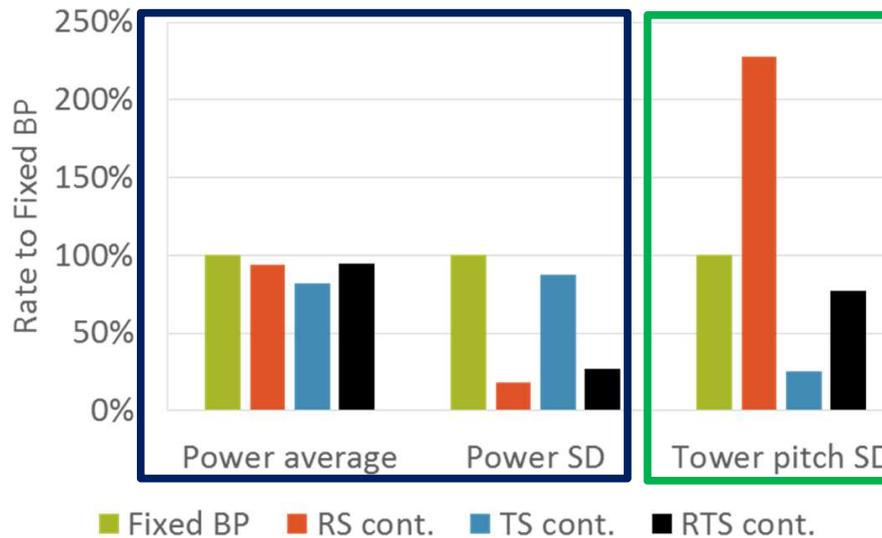
浮体式洋上風車の波運動とピッチ制御の負の連成振動の解明

出力低下を最小にしながら出力変動およびタワー運動を抑制する制御技術の提案



— Fixed BP — RS cont. — TS cont. — RTS cont.

— Thrust curve • RS × TS ▲ RTS



風力エネルギー

—国内外の最新動向と日本の探るべき方向性—

1. 風力エネルギーの研究
2. 日本における洋上風力プロジェクト
3. 欧州における洋上風力プロジェクト
- 4. 日本の探るべき方向性**
5. 結語

風力エネルギーの世界の設備容量（再掲）

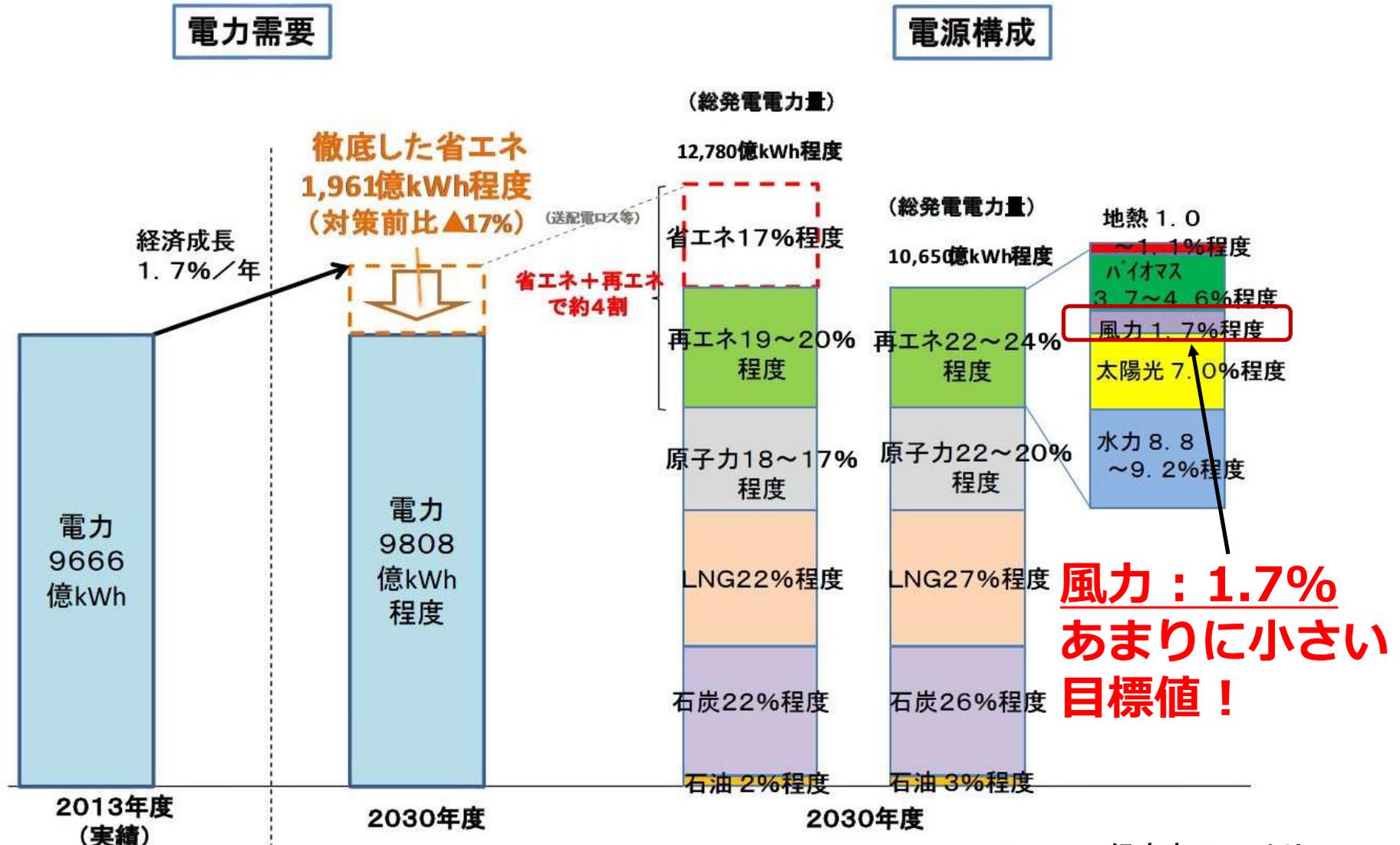
日本はトップ10に入っていない・・・3,038MW（18位？）

Position 2015	Country/Region	Total capacity end 2015** [MW]	Added capacity 2015*** [MW]	Growth rate 2015 [%]	Total capacity end 2014 [MW]
1	China	148'000	32'970	29.0	114'763
2	United States	74'347	8'598	13.1	65'754
3	Germany	45'192	4'919	11.7	40'468
4	India *	24'759	2'294	10.2	22'465
5	Spain	22'987	0	0.0	22'987
6	United Kingdom	13'614	1'174	9.4	12'440
7	Canada	11'205	1'511	15.6	9'694
8	France	10'293	997	10.7	9'296
9	Italy	8'958	295	3.4	8'663
10	Brazil	8'715	2'754	46.2	5'962
11	Sweden	6'025	615	11.1	5'425
12	Poland	5'100	1'266	33.0	3'834
13	Portugal	5'079	126	2.5	4'953
14	Denmark	5'064	217	3.7	4'883
15	Turkey	4'718	955	25.4	3'763
	Rest of the World	40'800	5'000	14.0	35'799
	Total	434'856	63'690	17.2	371'374

486GW(2016)、現在500GW超え

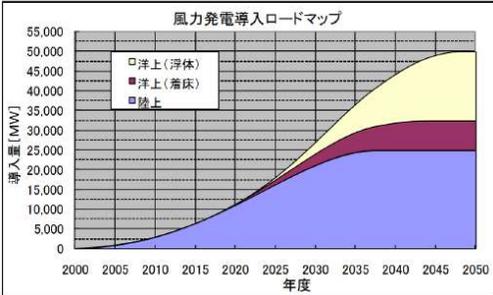
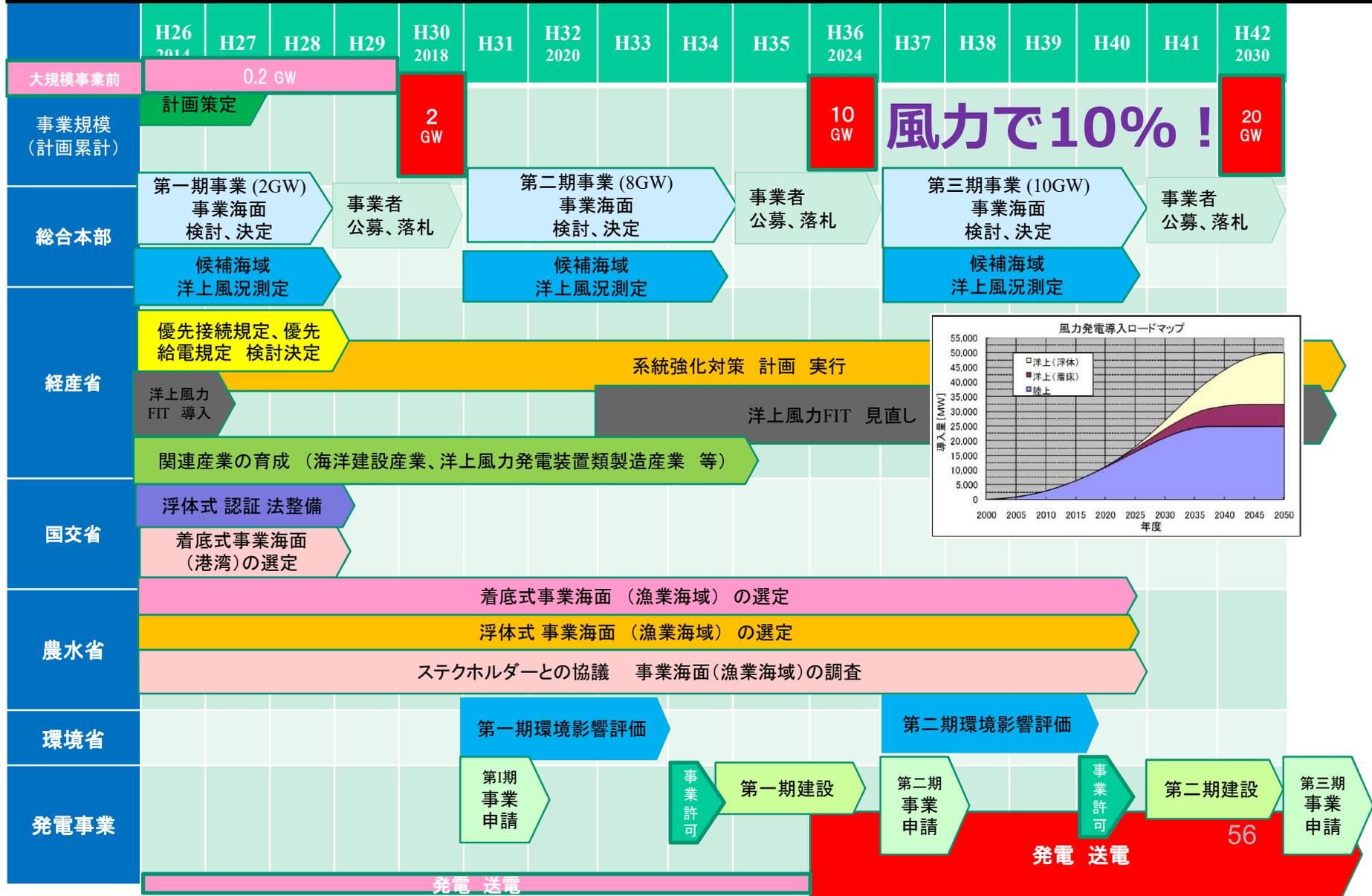
© WWEA - 2016

政府の2030年電力のベストミックス



洋上風力のロードマップの一例

内閣官房海洋政策本部 海洋産業PT報告書



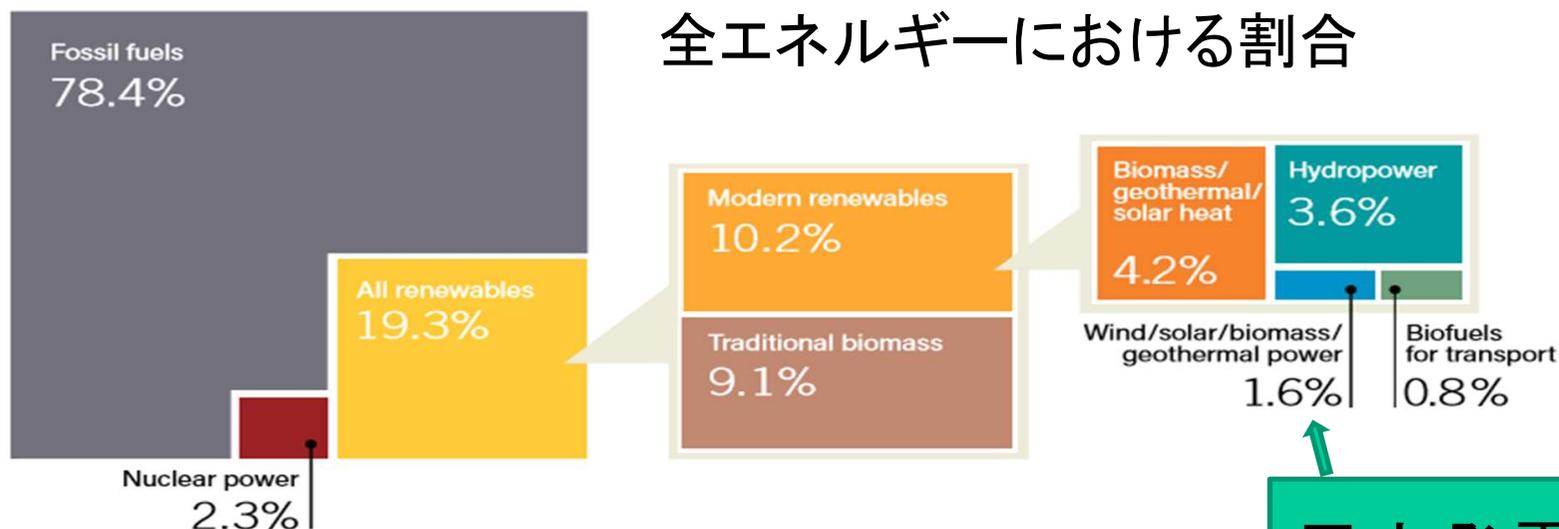
政府への提言

- 規模感のある風力エネルギーの目標量
 - 2030年 風力で10%の電力を賄う (1.7%)
 - 陸上風力30GW, 洋上風力20GW (10GW)
 - 再生可能エネルギーで30% (20%)
- 電力システムの整備、新設 政府の目標値
 - 再生可能エネルギー導入のため陸上システムの整備
 - 北本連系、日本海沿岸の海底ケーブルの増設・新設
 - 利用料金による回収(高速道路と同じシステム)
- 港湾地域に続き、一般海域における洋上風力発電のルール作り
- 再生可能エネルギー100% (RE100)への理解
 - 政治的背景
 - さらなる大規模な展開の必要性あり

世界の全エネルギーに対する再生可能エネルギーの割合

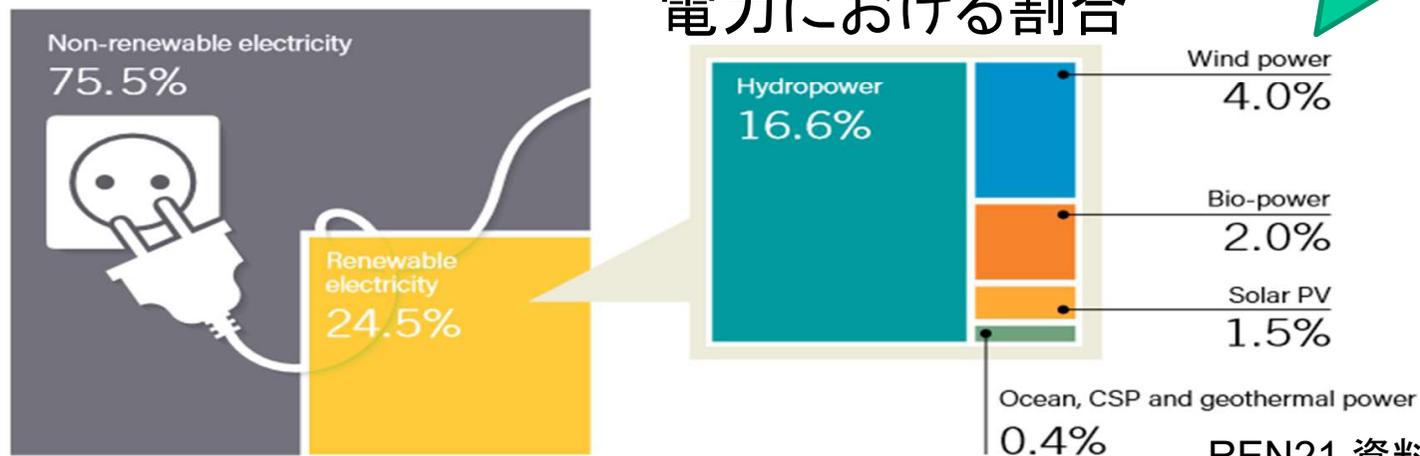
風力を含む再生可能エネルギーをさらに増やそう！

Estimated Renewable Energy Share of Total Final Energy Consumption, 2015

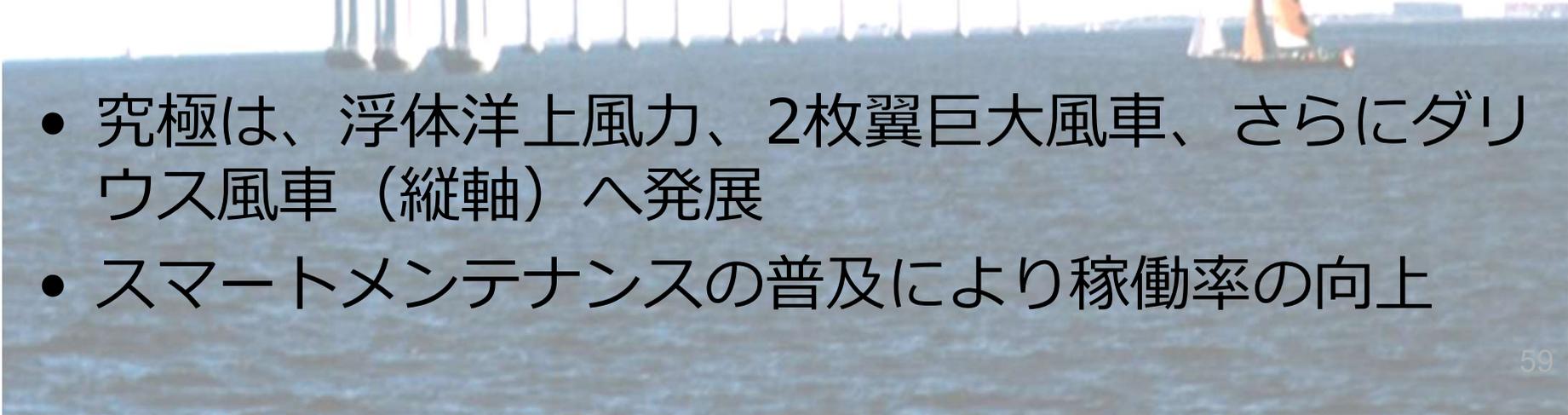


風力発電

Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2016



5. 結語

- 風力は再生可能エネルギーのトップランナー
 - 海はエネルギーの宝庫、EEZ（排他的経済水域）6位
 - 経済性で魅力ある洋上風力へ
 - 地域との連携、地域の発展、漁業協調へ
 - 港湾に続き、一般海域での洋上風力のルール作り
 - 電力システムの増強
 - 大きな風力ロードマップのもとにエネルギー政策を
- 
- 究極は、浮体洋上風力、2枚翼巨大風車、さらにダリウス風車（縦軸）へ発展
 - スマートメンテナンスの普及により稼働率の向上