

2018年12月7日 京都大学寄附講座研究会

# 洋上風力発電の国内外の最新動向と 日本の探るべき方向性

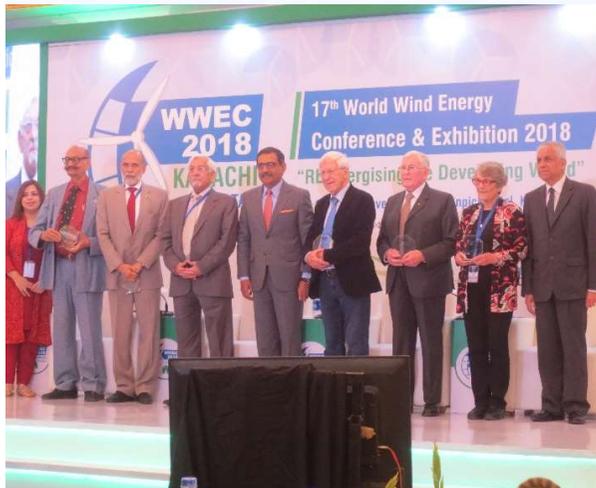
京都大学特任教授・東京大学名誉教授  
荒川 忠一

1. 風力エネルギーの最新事情
2. 着底（着床）式洋上風力プロジェクト
3. 浮体式洋上風力プロジェクト
4. 日本の探るべき方向性
5. 結語

# パキスタン・カラチにおける 世界風力エネルギー学会の開催

- 2001年に設立された初の風力発電の国際学会
- 2016年東京大学にて開催
- 途上国の風力発電促進にも注力
- エルサレム、ハバナ、カイロ、ブエノスアイレスなどでも開催、来年はブエノスアイレス
- パキスタンは現在1GW、数年で2.5GWを目指す
- カラチ付近のシンド州と中央政府の協力
- 海外からの進出が活発、中国が特に熱心
- 電力量1000億kWh、人口1億8千万、国土80万km<sup>2</sup>  
(日本比:1/10                      1.5倍                      2倍)
- 再生可能エネルギーへの期待が大きい、支援を！！

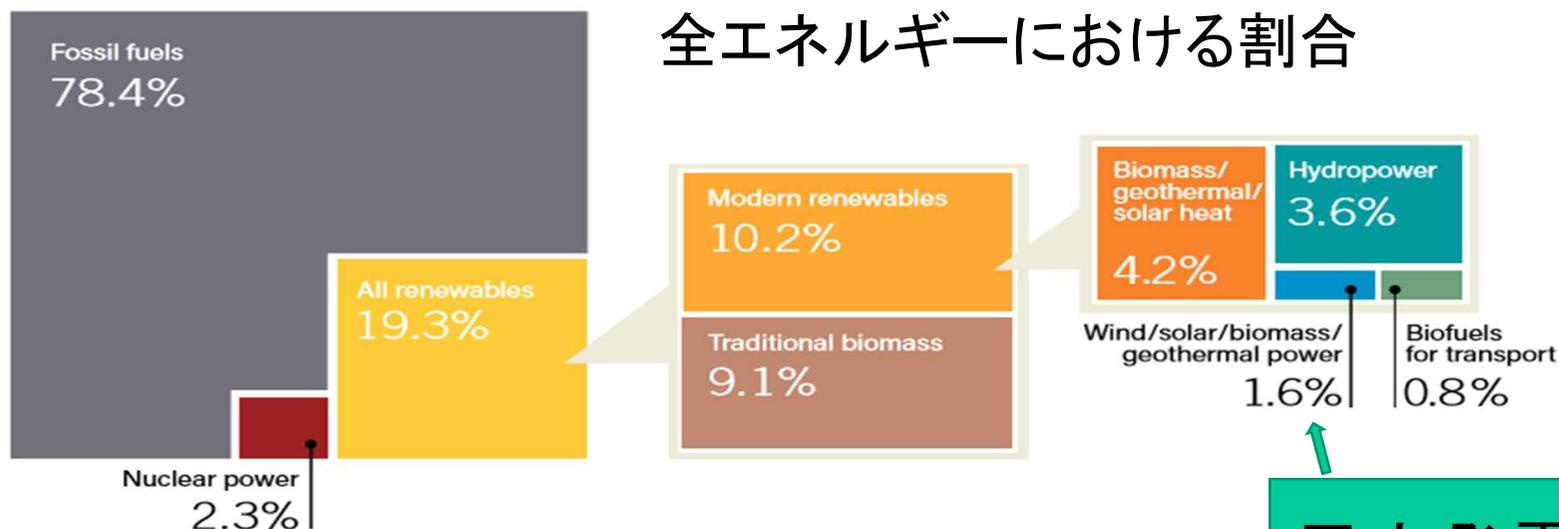
# WWEC2018カラチおよびスタディツアーの画像



# 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

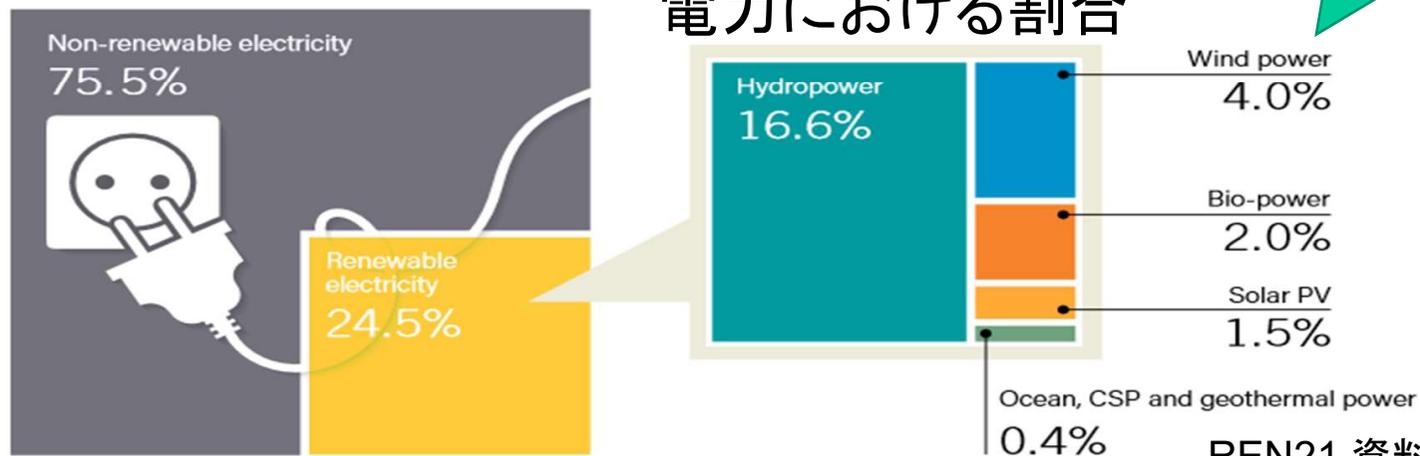
## 風力を含む再生可能エネルギーをさらに増やそう！

Estimated Renewable Energy Share of Total Final Energy Consumption, 2015



風力発電

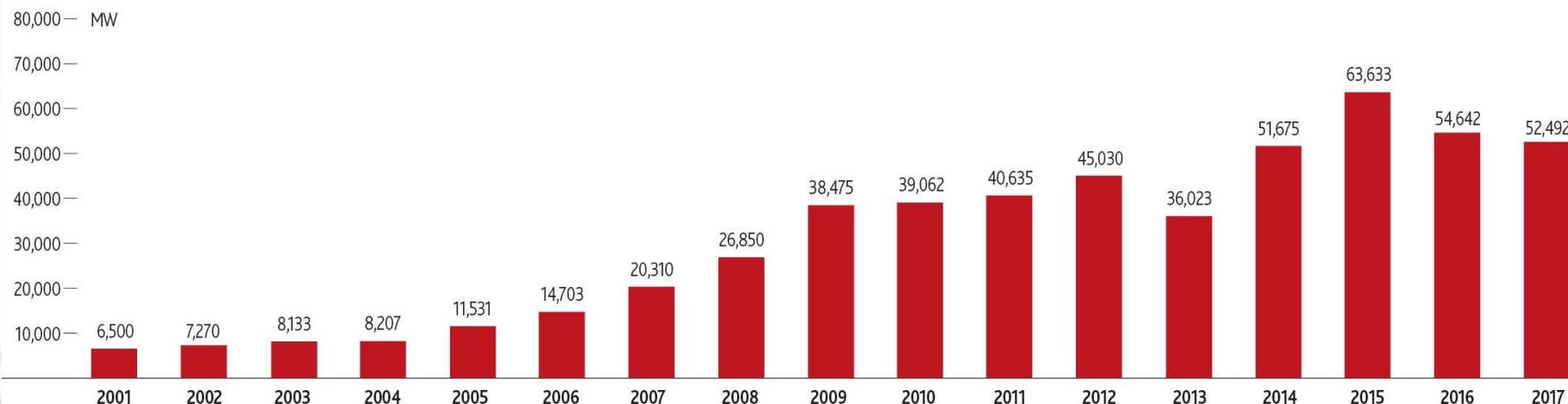
Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2016



# 世界の新設量と風車設備容量の増加

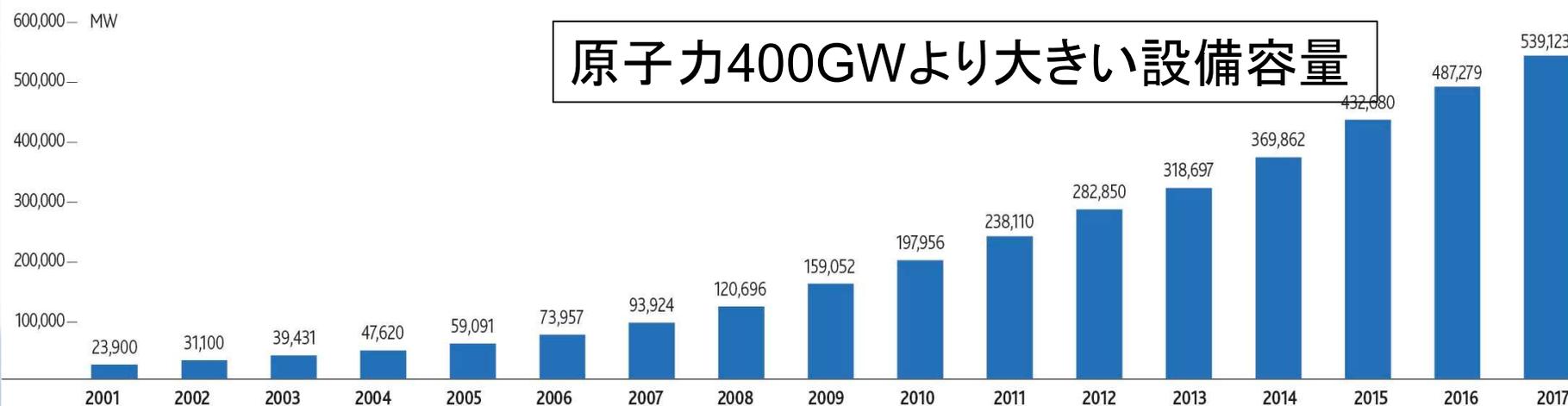
## 1年で30%の増加、10年で10倍

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



Source: GWEC

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



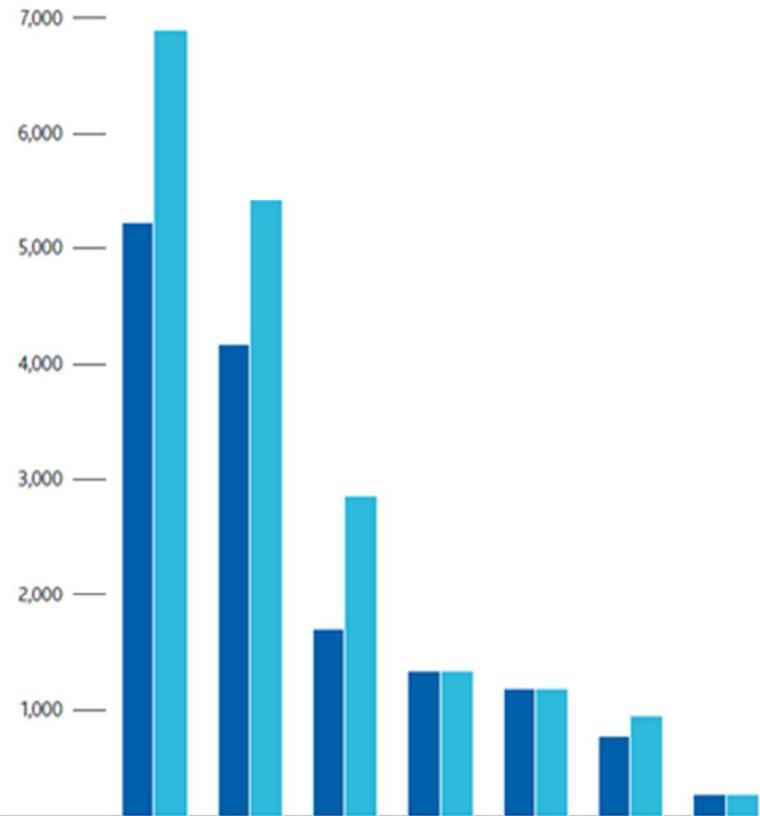
5

Source: GWEC

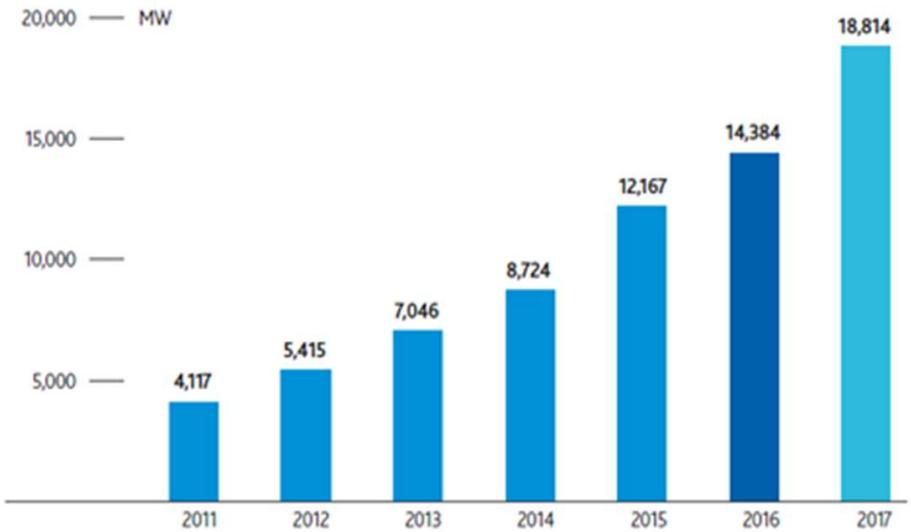
# 洋上風力発電の世界の設備容量

GLOBAL CUMULATIVE OFFSHORE WIND CAPACITY IN 2017

8,000 — MW    ■ Cumulative capacity 2016    ■ Cumulative capacity 2017



CUMULATIVE OFFSHORE WIND CAPACITY 2011-2017



Source: GWEC

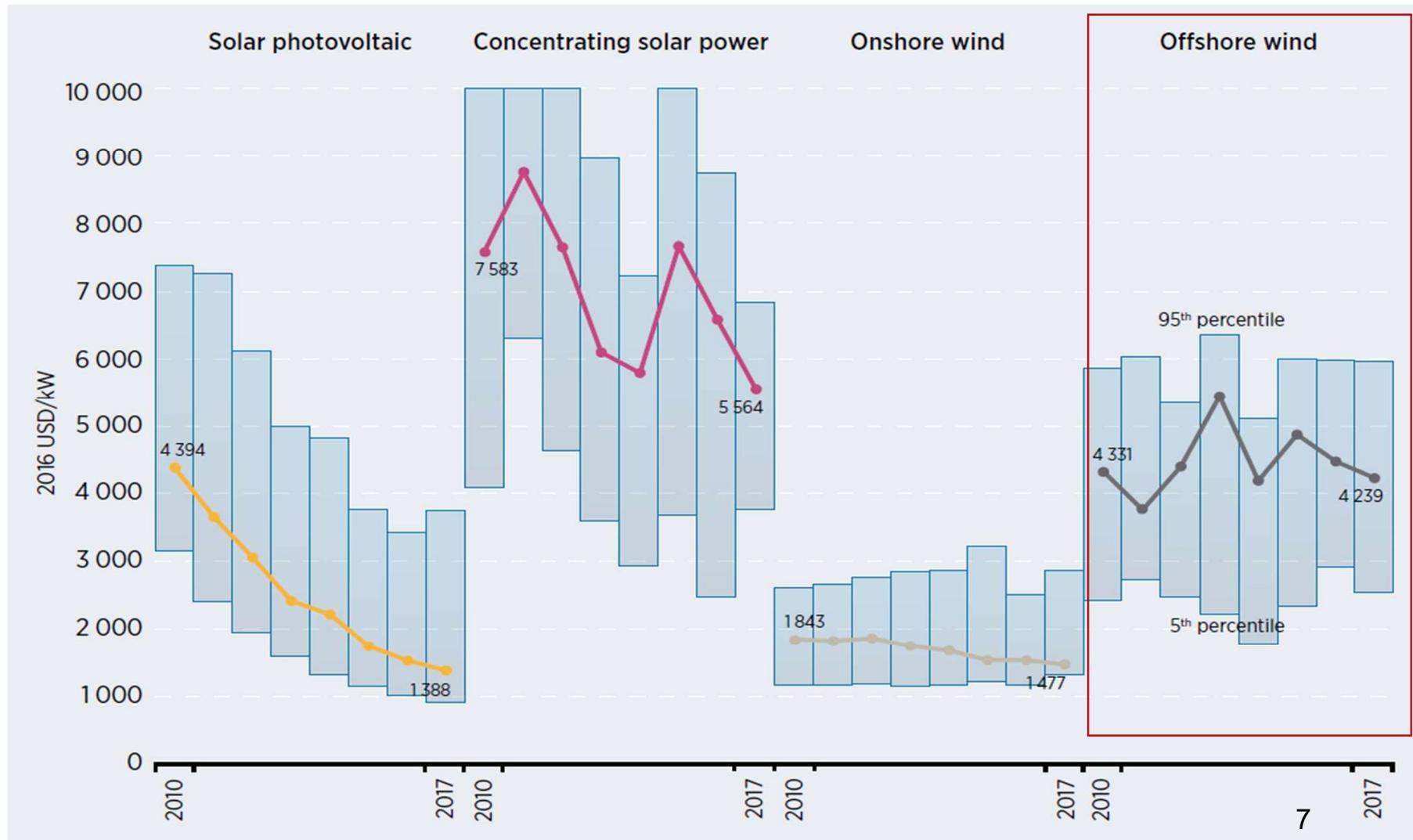
日本は10位

	UK	Germany	PR China	Denmark	Netherlands	Belgium	Sweden	Vietnam	Finland	Japan	South Korea	United States	Ireland	Taiwan	Spain	Norway	France	Total
Total 2016	5,156	4,108	1,627	1,271	1,118	712	202	99	32	60	35	30	25	0	5	2	0	14,483
New 2017	1,680	1,247	1,164	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	4,334
Total 2017	6,836	5,355	2,788	1,271	1,118	877	202	99	92	65	38	30	25	8	5	2	2	18,814

Source: GWEC

# 洋上風力の価格比較(1) 導入コスト

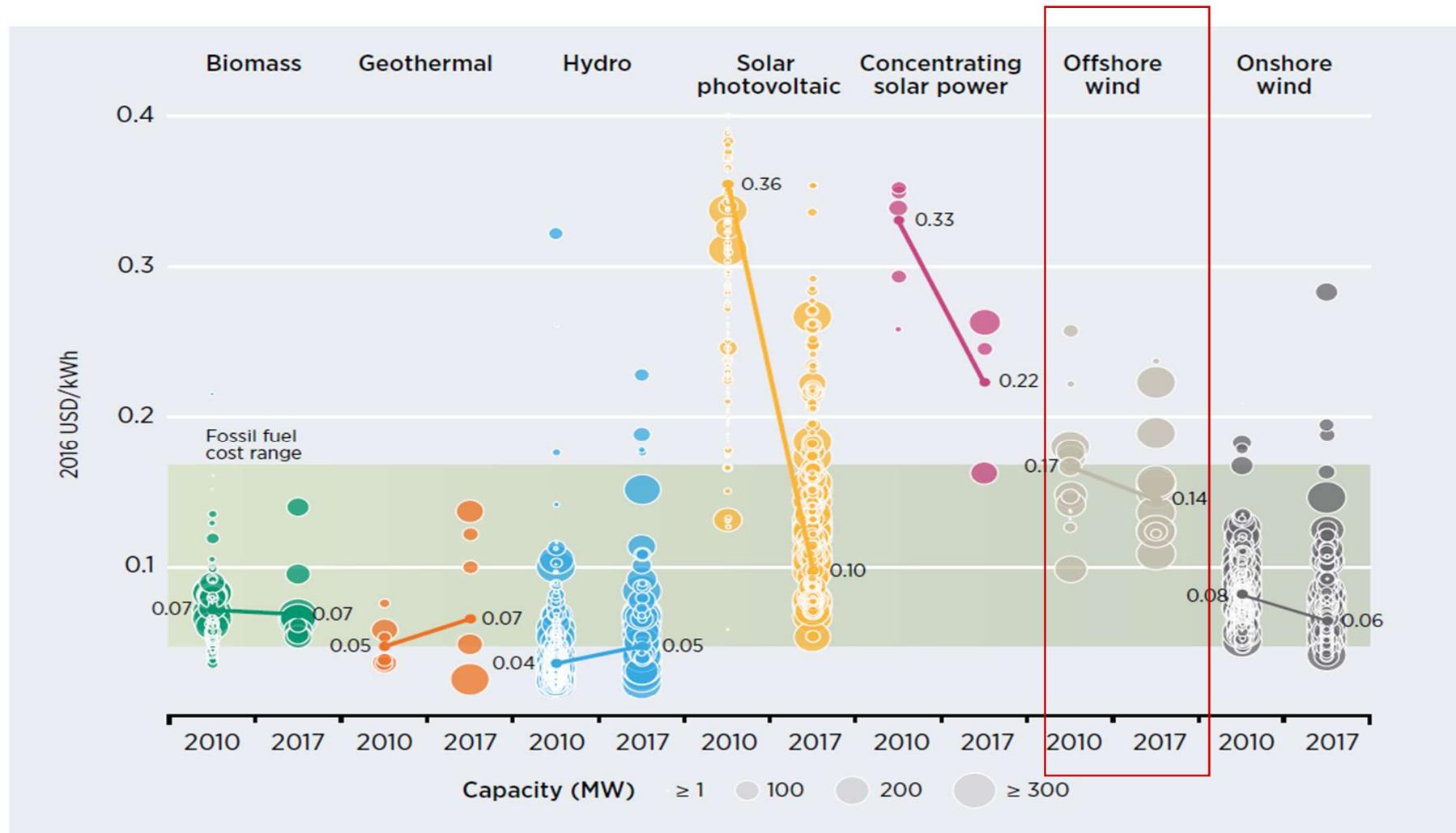
**Figure ES.4** Global weighted average total installed costs and project percentile ranges for CSP, solar PV, onshore and offshore wind, 2010-2017



Source: IRENA Renewable Cost Database.

# 洋上風力の価格比較(2) 発電コスト

**Figure 2.1** Global levelised cost of electricity from utility-scale renewable power generation technologies, 2010-2017

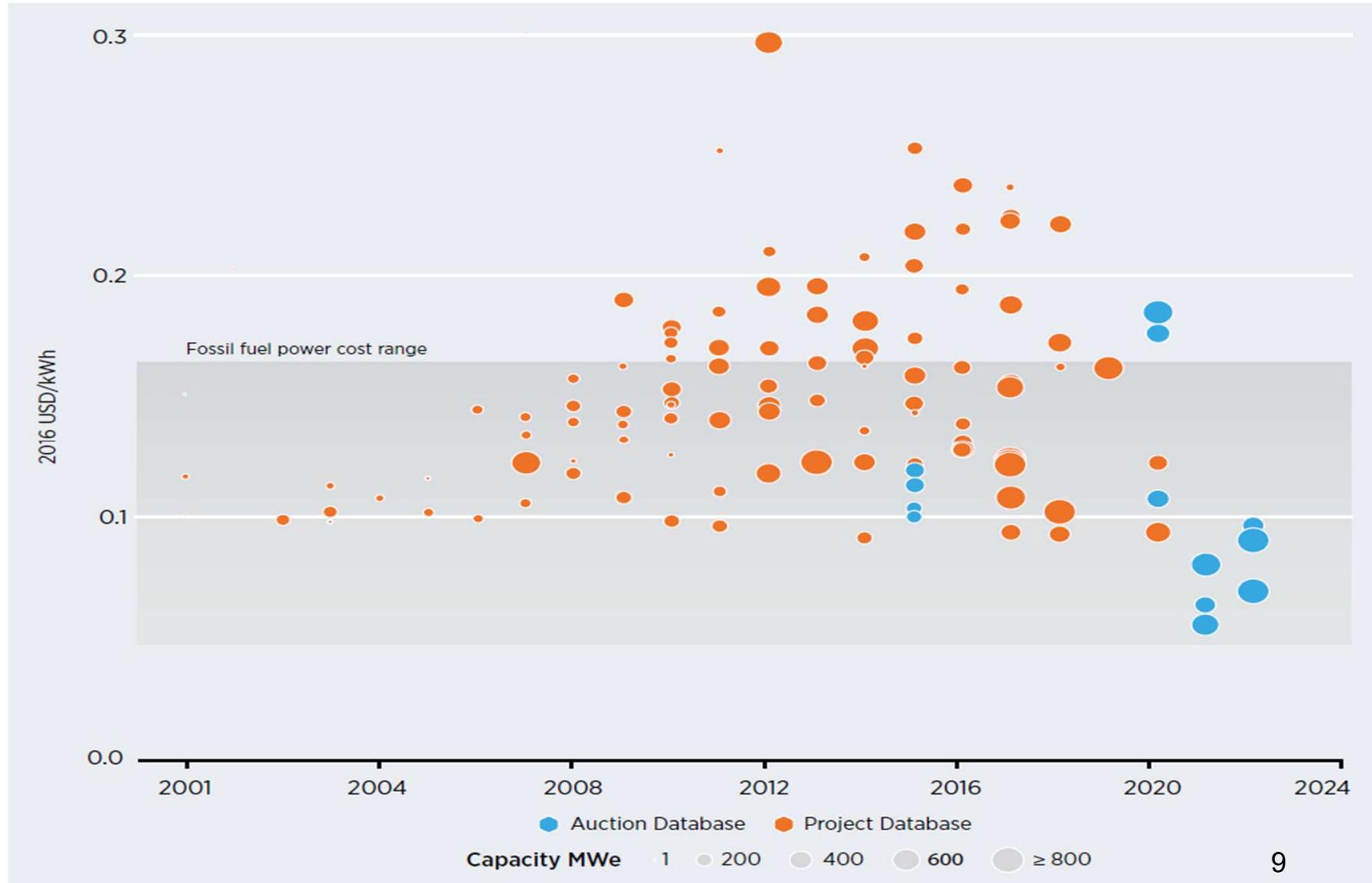


Source: IRENA Renewable Cost Database.

Note: Each circle represents an individual project in the IRENA Renewable Cost Database, with the centre of the circle representing the LCOE value on the Y-axis and the diameter of the circle the size of the project. The lines represent the global weighted average LCOE value for a given years newly commissioned projects, where the weighting is based on capacity deployed by country/year.

# 洋上風力の価格比較(3) 発電コストの推移

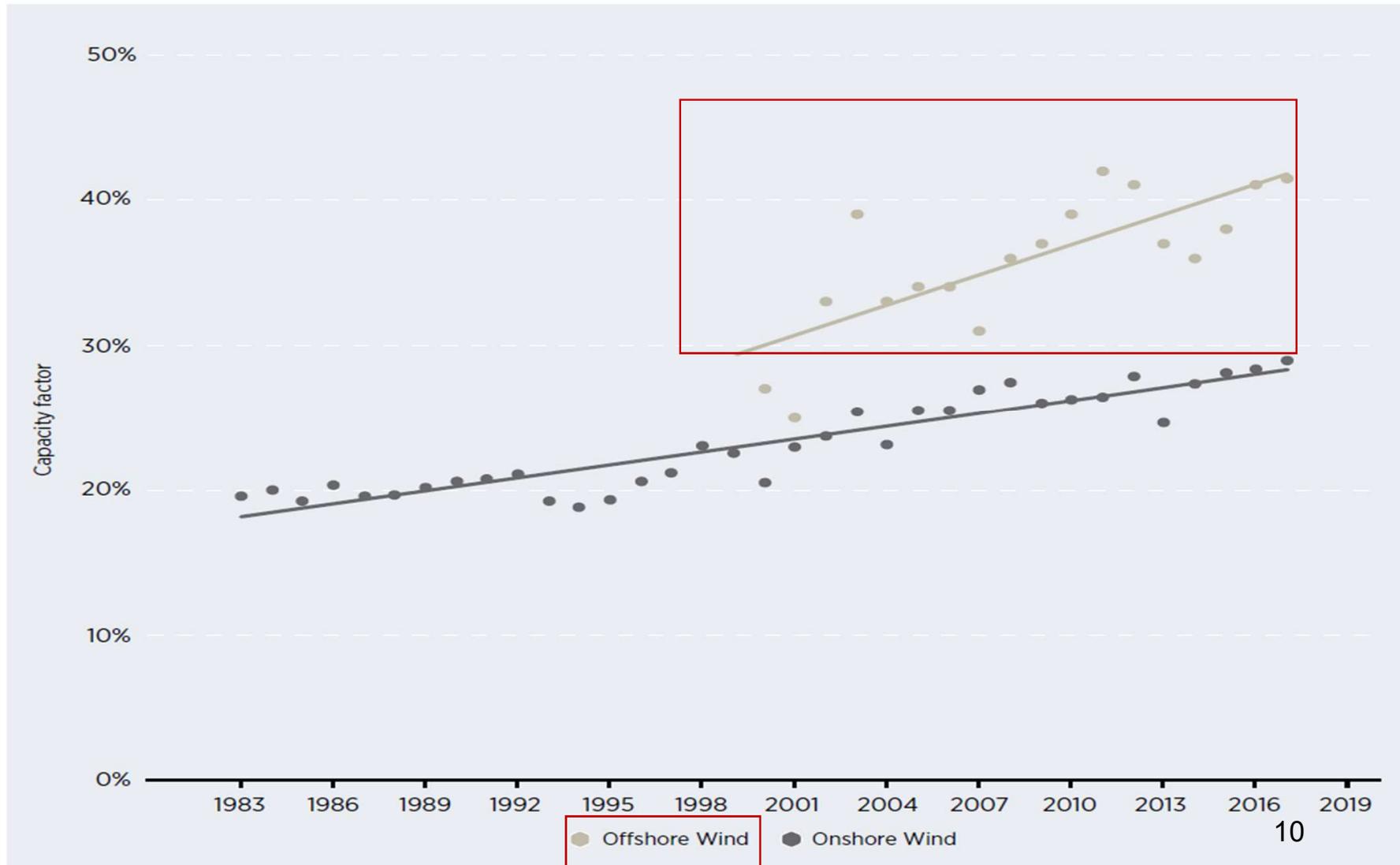
Figure 5.20 The LCOE of commissioned and proposed offshore wind projects and auction results, 2000-2022



Source: IRENA Renewable Cost Database and IRENA PPA Database

# 洋上風力の価格比較(4) 設備利用率の推移

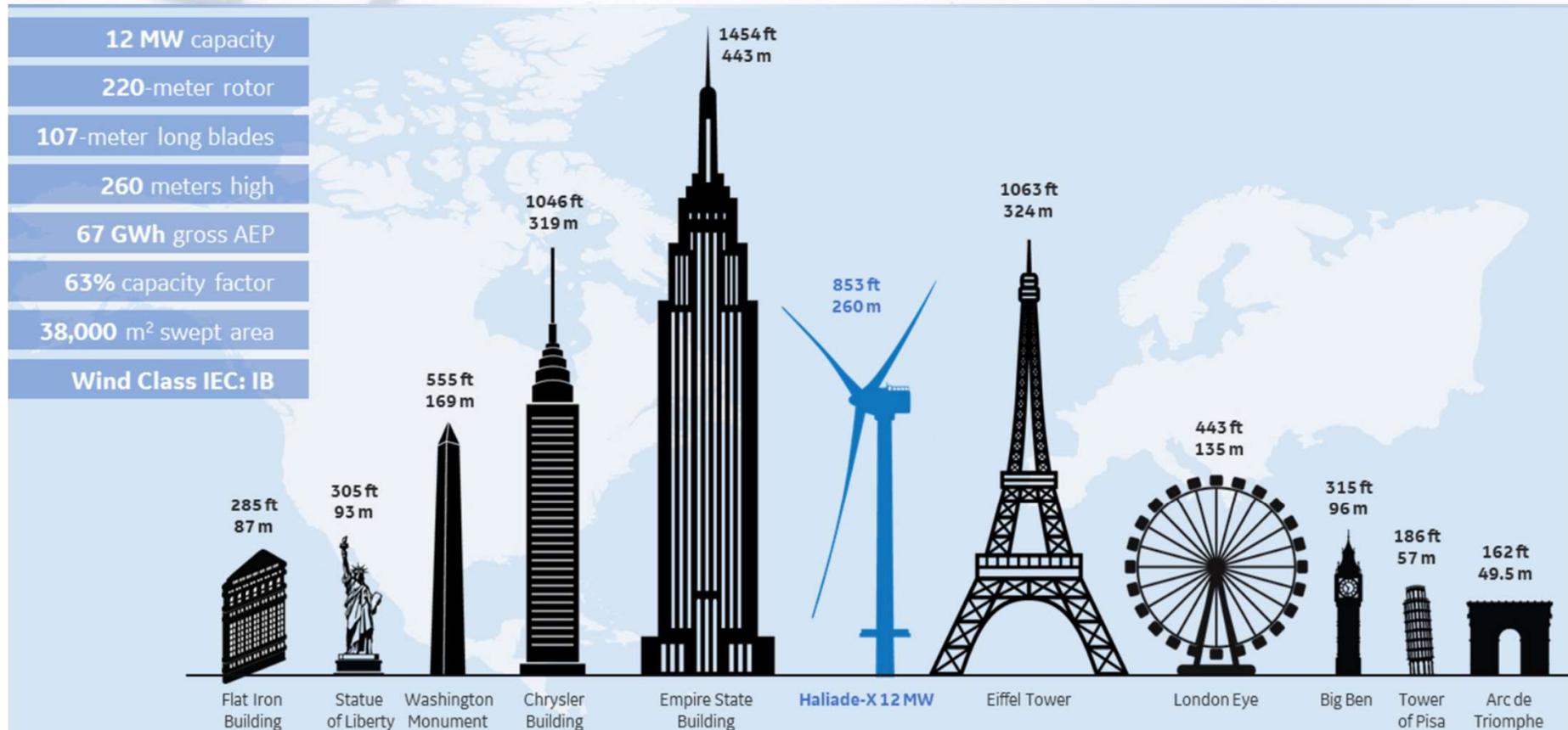
Figure 5.11 Global weighted average capacity factors for new onshore and offshore wind power capacity additions by year of commissioning, 1983-2017



Source: IRENA Renewable Cost Database.

# 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



SOURCE: GE Renewable Energy

2018年12月7日 京都大学寄附講座研究会

# 洋上風力発電の国内外の最新動向と 日本の探るべき方向性

京都大学特任教授・東京大学名誉教授  
荒川 忠一

1. 風力エネルギーの最新事情
2. **着底（着床）式洋上風力プロジェクト**
3. 浮体式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



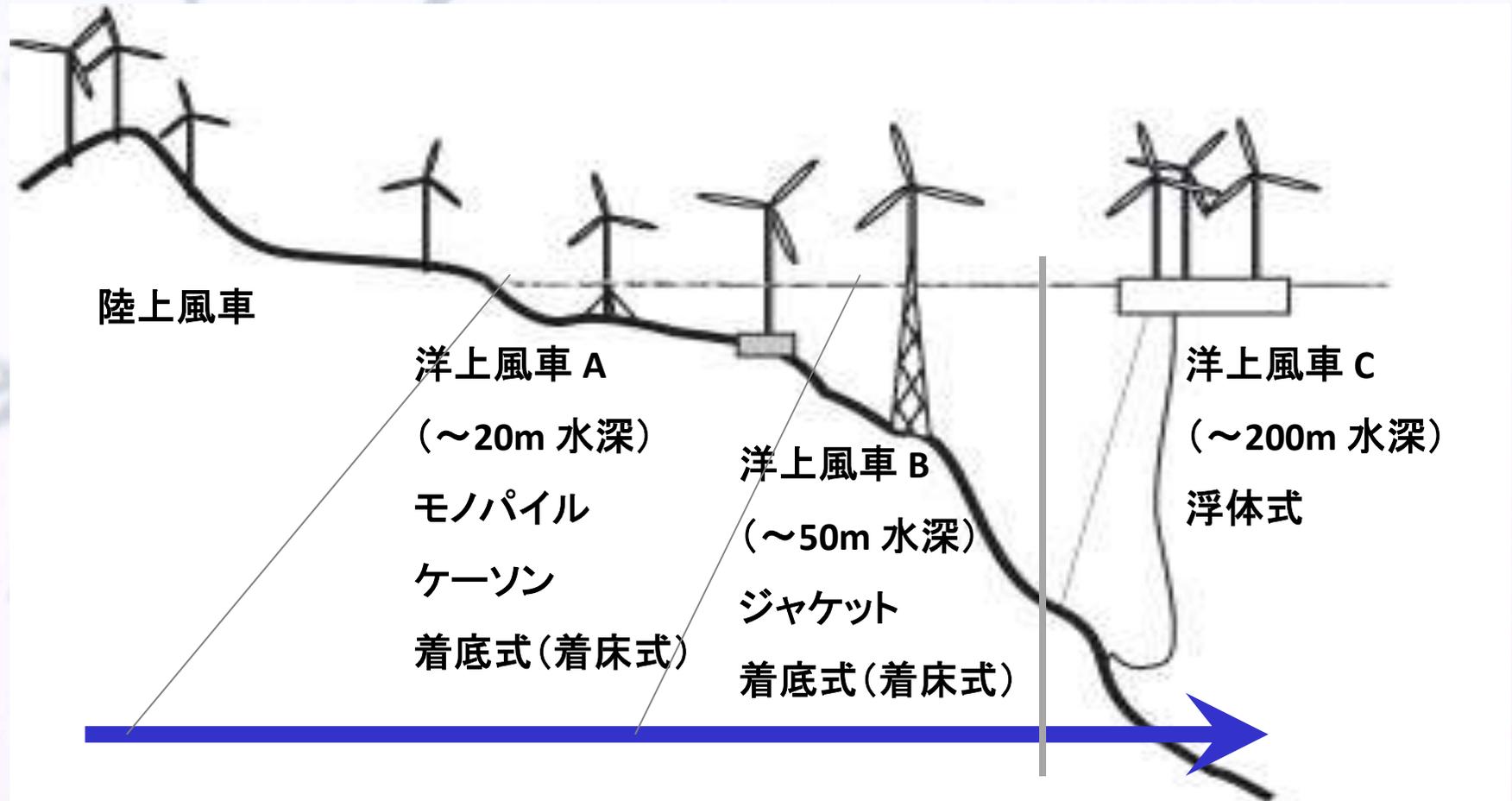
- Middelgrunden 2MW x 20:コペンハーゲン沖に2000年に運開
- 世界で最も美しいウィンドファームと言われる

# 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

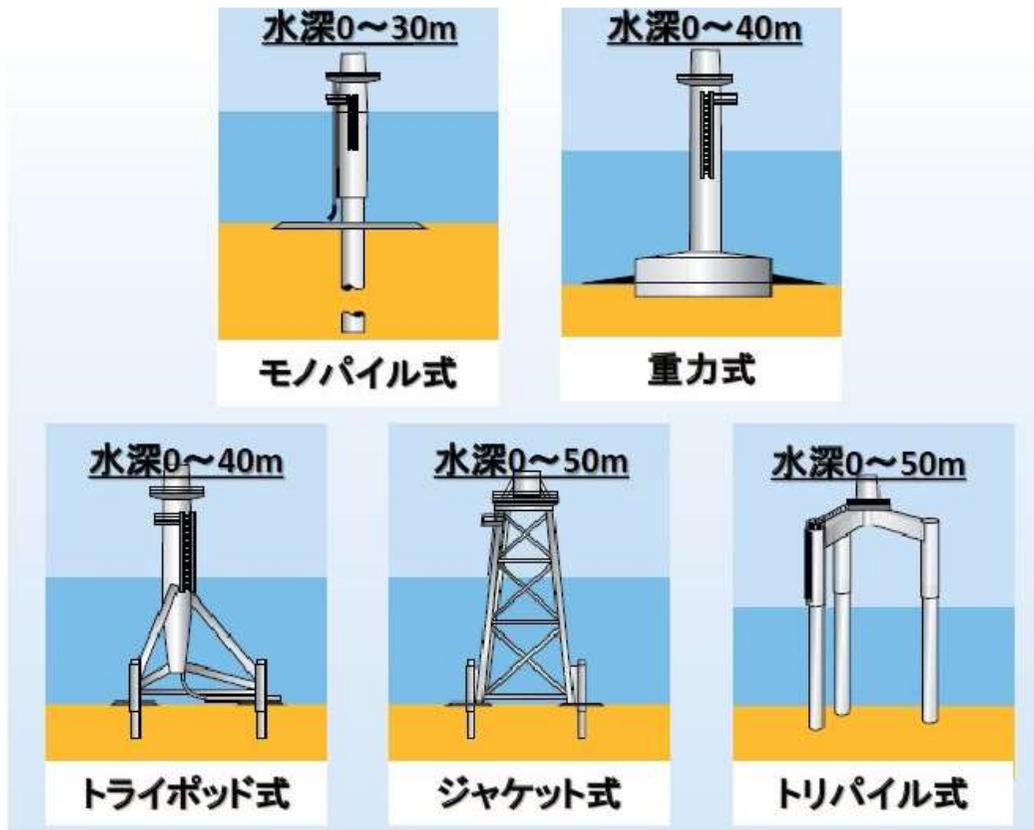


現在の商業運転

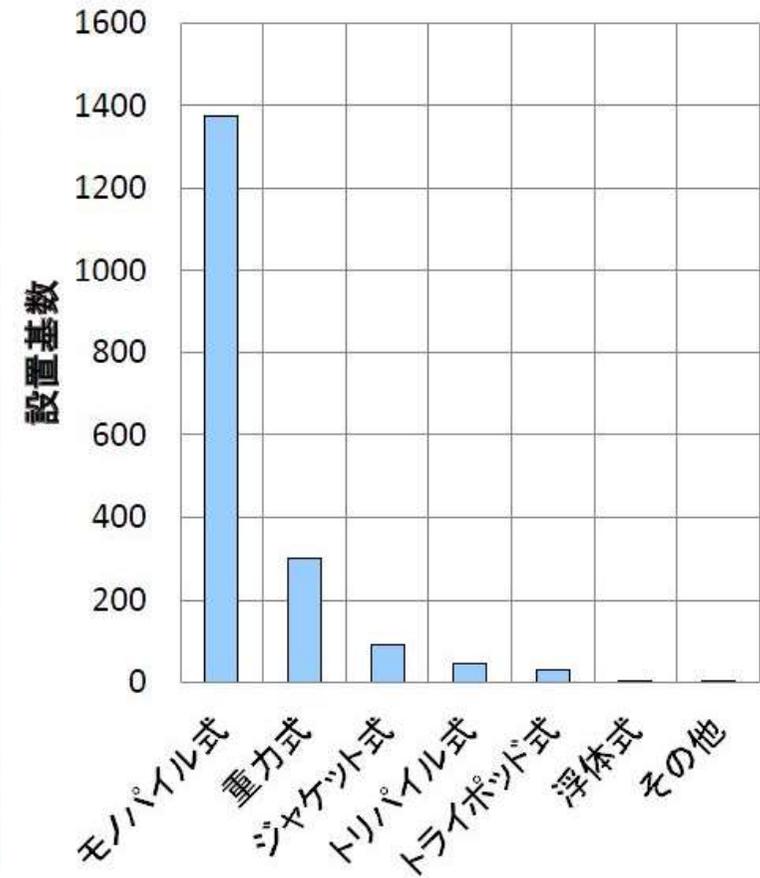
最先端の洋上風車

## 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



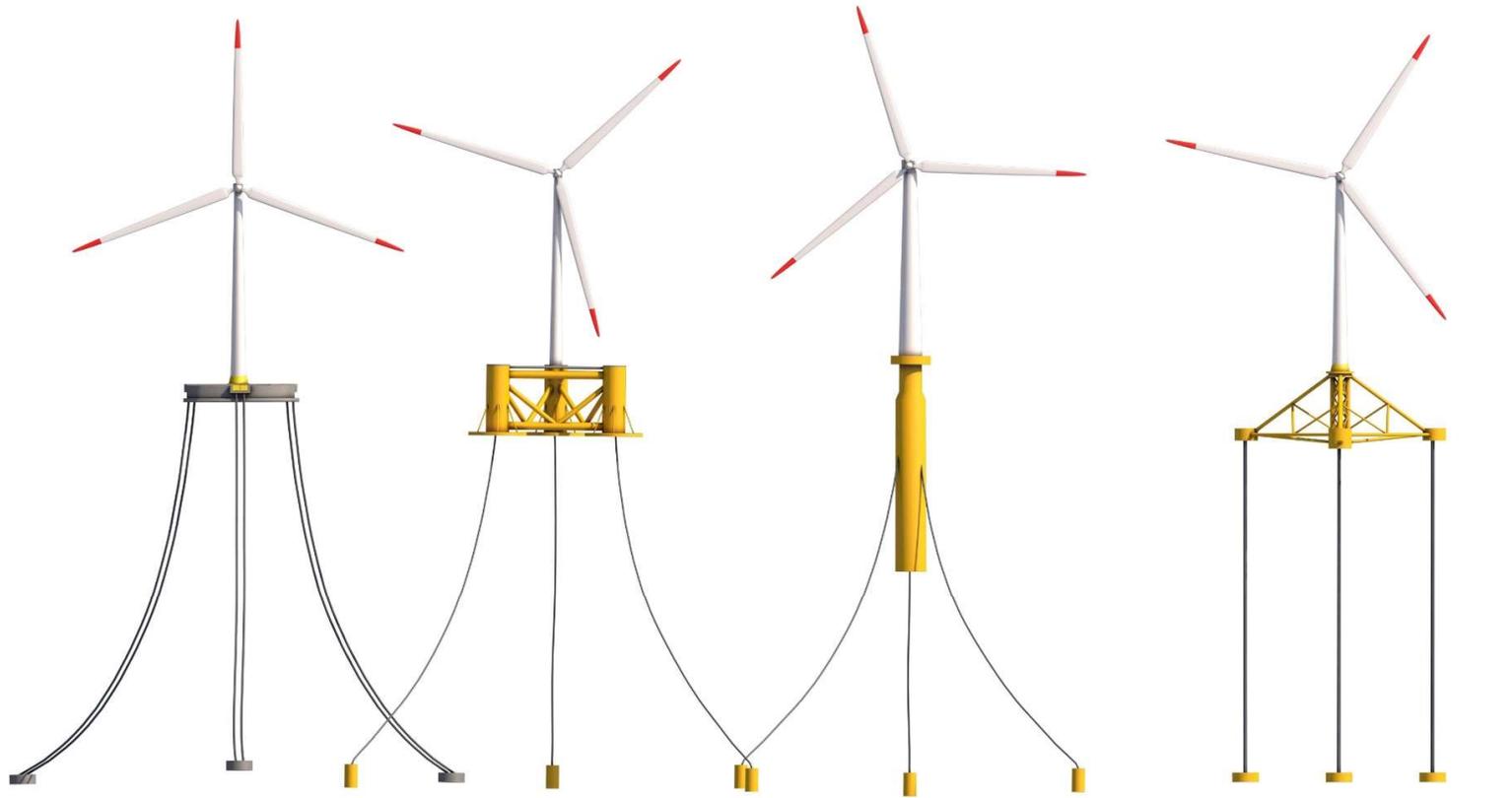
2018年12月7日 京都大学寄附講座研究会

# 洋上風力発電の国内外の最新動向と 日本の探るべき方向性

京都大学特任教授・東京大学名誉教授  
荒川 忠一

1. 風力エネルギーの最新事情
2. 着底（着床）式洋上風力プロジェクト
- 3. 浮体式洋上風力プロジェクト**
4. 日本の探るべき方向性
5. 結語

# 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

IDEOL 山田睦氏提供

# 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

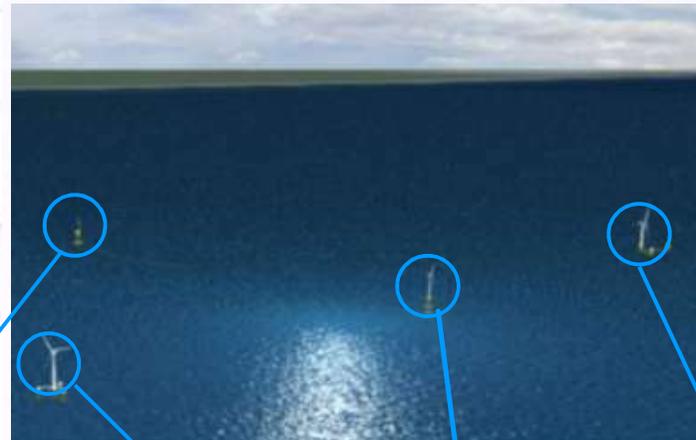
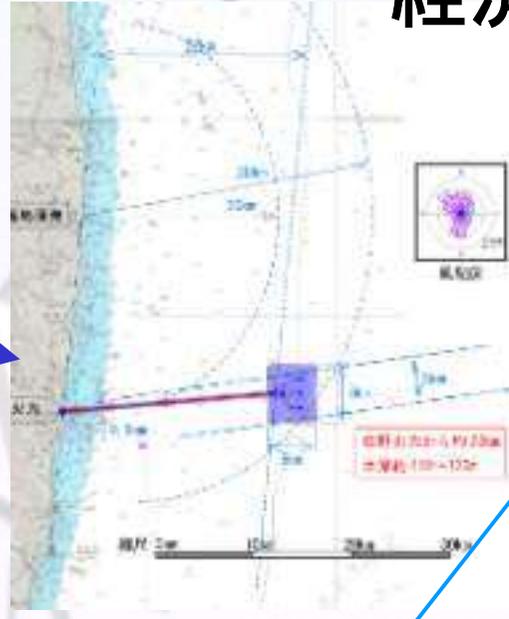
Source; MOE Project consortium



# 世界に誇る日本の浮体式洋上風車(2)

## 経済産業省 福島PJ

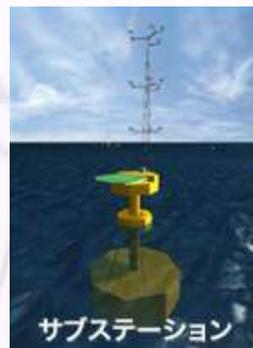
PJ開始時に提供のあった資料より



### 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



サブステーション

**Hitachi**  
**JMU Spar**

2013



4コラム型セミサブ

**Hitachi 2MW**  
**Mitsui semi-sub**

2014



アドバンストスパー

**MHI 7MW**  
**JMU Spar**

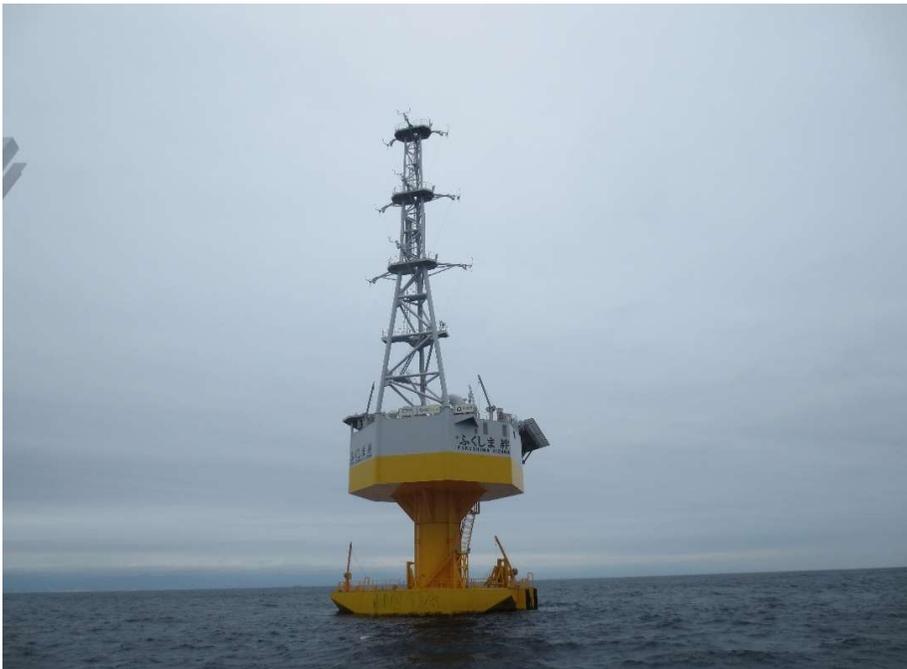
2014



3コラム型セミサブ

**MHI 7MW**  
**MHI semi-sub**

Source; Fukushima offshore wind consortium 24



福島 浮体式洋上風車  
筆者撮影(2017年7月)

# 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会の検証結果と提言（概要版）

## 本実証研究事業の目的

- 世界初の複数基による浮体式洋上風力発電システムの実証を行い、安全性・信頼性・経済性を明らかにする。
- 発電事業が見通せるような設備利用率を達成し、県や民間主導による本格的な浮体式洋上ウィンドファームの実現を目指す。
- 福島沖の浮体式洋上風力発電システムの実証と事業化により風力発電関連産業の集積を期待。

## 実証研究事業の実績

- 3つの世界初：①浮体式初の複数基による実証、②世界最大級の風車の浮体への搭載と実証海域への設置、③浮体式の洋上変電所の設置。
- 風力関連産業の集積等：①世界最大級の風車の組み立てを可能とする小名浜港の地耐力強化、②地元企業による風車タワー及びケーブル用パイの製造、③風力発電事業と漁業との共存の検証。

## 実証機の検証結果と提言（共通事項）

- 一部、データ取得の継続による検証が必要であるが、浮体式洋上風力発電システム全体の、安全性・信頼性・経済性の「検証」について、現状は所期の目的を達成しつつある。
- 経済性の観点では、実証機2基（2MW機及び5MW機）の組合せと運用方法やコスト構造の見直しにより将来的には自立的な運用となることが見込める。その実現に向けては、実証機の安定稼働と維持管理費（特に運転共通費）の低減が急務であり、併せて、維持管理費への影響が大きい浮体への乗り移り率の改善が必要。

実績	検証結果	検証を踏まえた提言
 <p>稼働率：94.1% 設備利用率：32.9% (H29.7~H30.6) 運転開始：H25.11 運転期間：4年8ヶ月</p>	<p>&lt;2MW風車：量産された商用機&gt; 稼働率は95%程度で概ね商用水準。</p> <p>&lt;4-カラムセミサブ浮体&gt; 稼働率は99%以上で可用性が高い。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 発電設備容量に対し、現状の実証研究事業で要している浮体式特有の維持管理費が高額。</li> <li>● 将来的に5~6MW級風車向けへの再設計では、発電設備容量あたりの資本費の低減を見込める。</li> </ul> <p>更なる維持管理費の低減に向けた取り組みを継続しつつ、長期の運転実績の積み重ねによる保険料の低減等、導入を加速する環境づくりの基盤構築としても運転の継続が必要。</p>
 <p>稼働率：61.3% 設備利用率：18.5% (H29.7~H30.6) 運転開始：H29.2 運転期間：1年5ヶ月</p>	<p>&lt;5MW風車：2基目の実証機&gt; 初期不具合が解消し、設備利用率が向上している。</p> <p>&lt;アドバンストスパー浮体&gt; 引き続きデータを取得し安全性・信頼性を検証中。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2基目の実証機であり、完成度は発展途上。</li> <li>● 事業性を期待されるが、運転期間が短く、検証が不十分。</li> <li>● 浮体動揺の観点では、5MW風車には過剰な設計で、セミサブと比較してコスト面での優位性は確認できなかった。</li> </ul> <p>本年度導入した制御システムの検証、稼働データの長期取得、メンテナンス最適化のため、十分な運転期間における実証の継続が必要。</p>
 <p>稼働率：16.4% 設備利用率：3.7% (H29.7~H30.6) 運転開始：H27.12 運転期間：2年7ヶ月</p>	<p>&lt;7MW風車：2基目の実証機&gt; 油圧システムの初期不具合等で低水準の稼働率で推移。</p> <p>&lt;V字型セミサブ浮体&gt; 疲労損傷対策を通じて応力計算方法を精緻化。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 油圧システムの長寿命化等の課題が残る。また、定格出力による安定稼働に至らず、今後も安定稼働は難しい。</li> <li>● シンプルな設計にしており、更なる設計の最適化で、資本費の低減の可能性はある。</li> </ul> <p>油圧システムの課題が残る、当該実証機による商用運転の実現は困難である。維持管理費も高額なことから、早急に発電を停止し、撤去の準備を進めるべき。</p>
 <p>稼働率：100% 設備利用率：100% (H29.7~H30.6) 運転開始：H25.11 運転期間：4年8ヶ月</p>	<p>&lt;洋上変電所&gt; 設置後異常は生じていない。</p> <p>&lt;アドバンストスパー浮体&gt; 稼働率は100%で可用性が高い。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● これまで異常もなく、実証海域においては陸上と同じメンテナンスで問題ない。</li> <li>● 洋上変電所が許容できる加速度や傾斜が緩和できれば、設計の最適化で資本費の低減を見込める。</li> </ul> <p>変電所を継続して運転し、中長期的な視点で発電システム全体の信頼性の向上を検証することが必要。</p>
<p>&lt;ケーブル&gt; 工事期間を除き稼働率は100%で信頼性が高い。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 既設ケーブルに付着した海洋生物を除去する低コスト化方法や将来的なメンテナンスフリー工法を検討中。</li> </ul>	<p>得られた知見からケーブルの更なるコスト低減や信頼性向上のため、浮体設計への要望を提言するべき。</p>
<p>&lt;撤去の検討&gt; 本実証研究事業の実証機を撤去する場合の撤去費は、現状では民間事業として困難な水準である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現在の撤去工法では、安全性が十分には考慮されておらず、危険が伴う可能性が高い。また、実証機は計画・設計時点で撤去工法まで十分に考慮されておらず、撤去費が高額な一因となっている。</li> </ul>	<p>安全性・経済性を十分に考慮した撤去工法を講じること、撤去費の低減につながる浮体設計への要望を提言するべき。さらに、ベンチマークとなる海外事例を収集し、さらなる撤去費の低減策を講じる必要がある。</p>

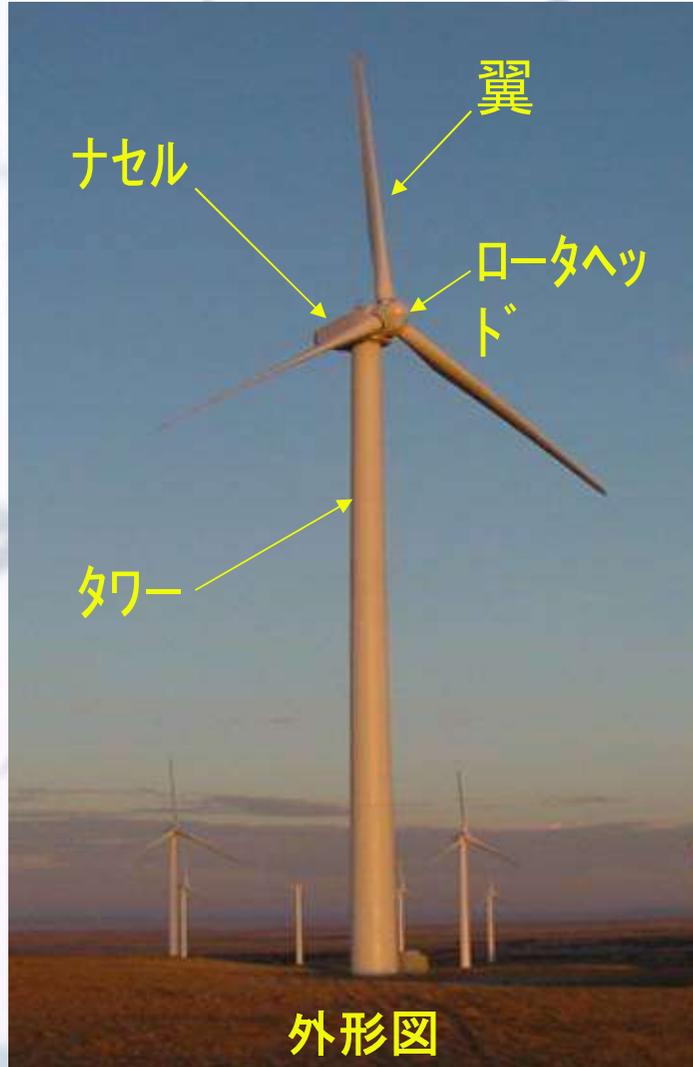
福島沖での実証の継続

## 浮体式洋上風力発電システムの検証を踏まえた将来への提言

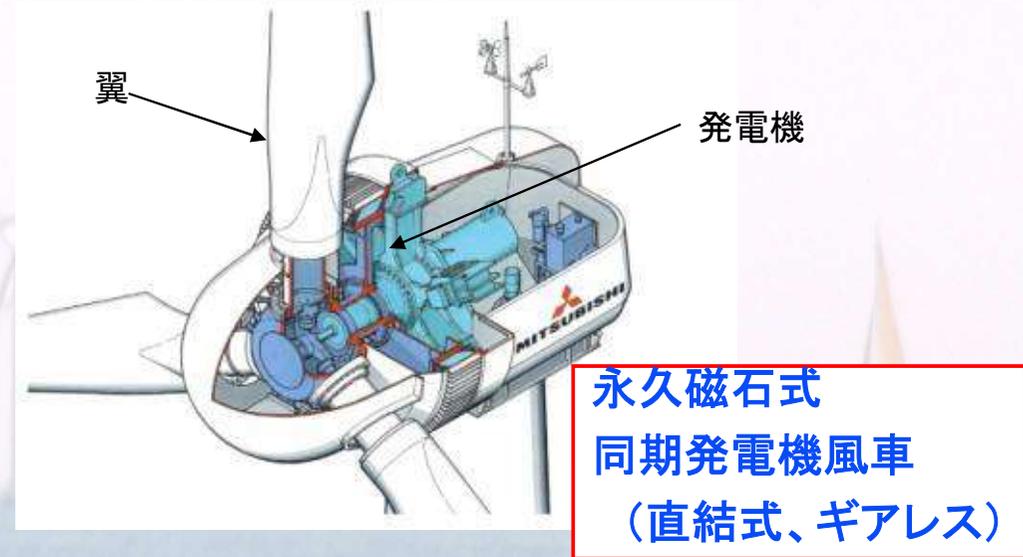
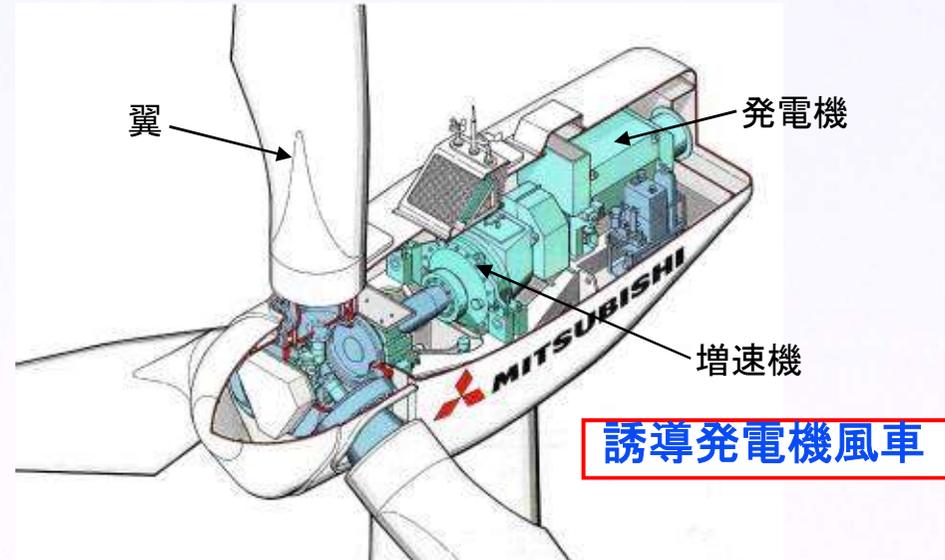
※本委員会は、平成30年6月末時点の実証研究事業の実績およびデータにもとづいて検証を行った。

- 再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、導入ポテンシャルの高い浮体式洋上風力発電は、日本にとって重要な位置づけとなり得る。
- この実証研究事業の経験を踏まえ、将来、福島沖のみならず日本及び海外において浮体式洋上風力発電システムの導入拡大に貢献することを期待したい。

# 風力発電装置本体とドライブトレイン



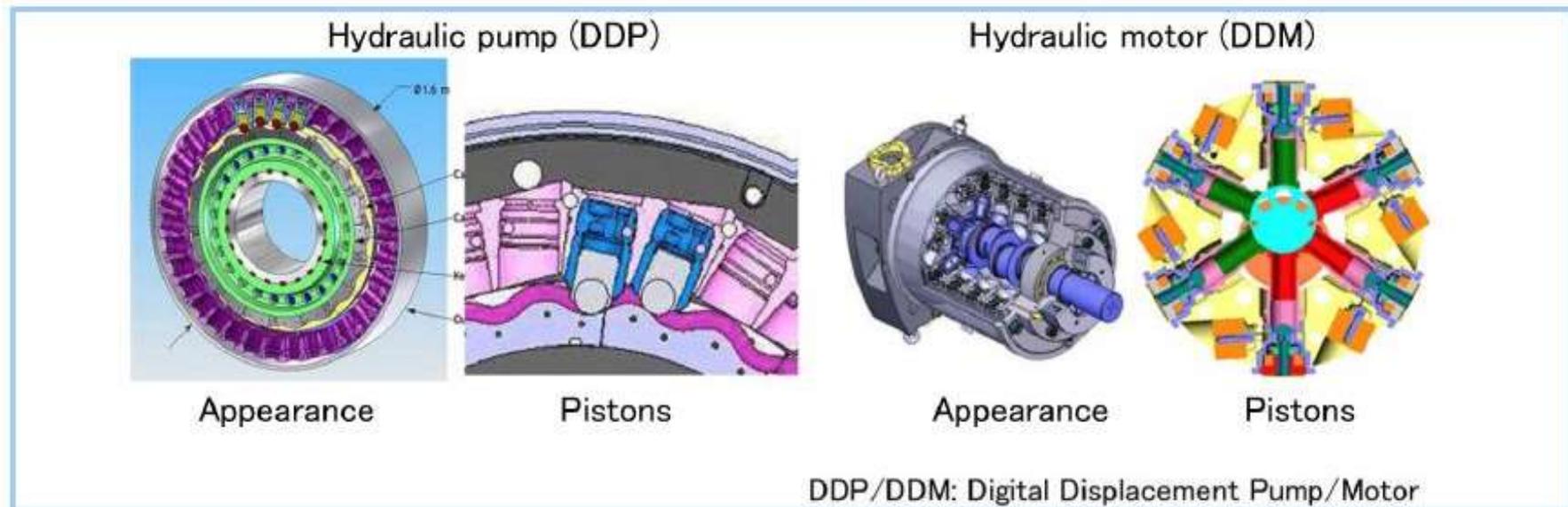
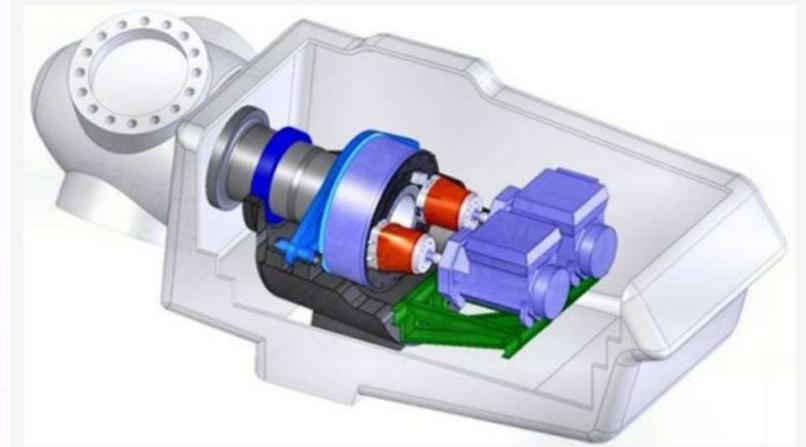
MHI 協力



# 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

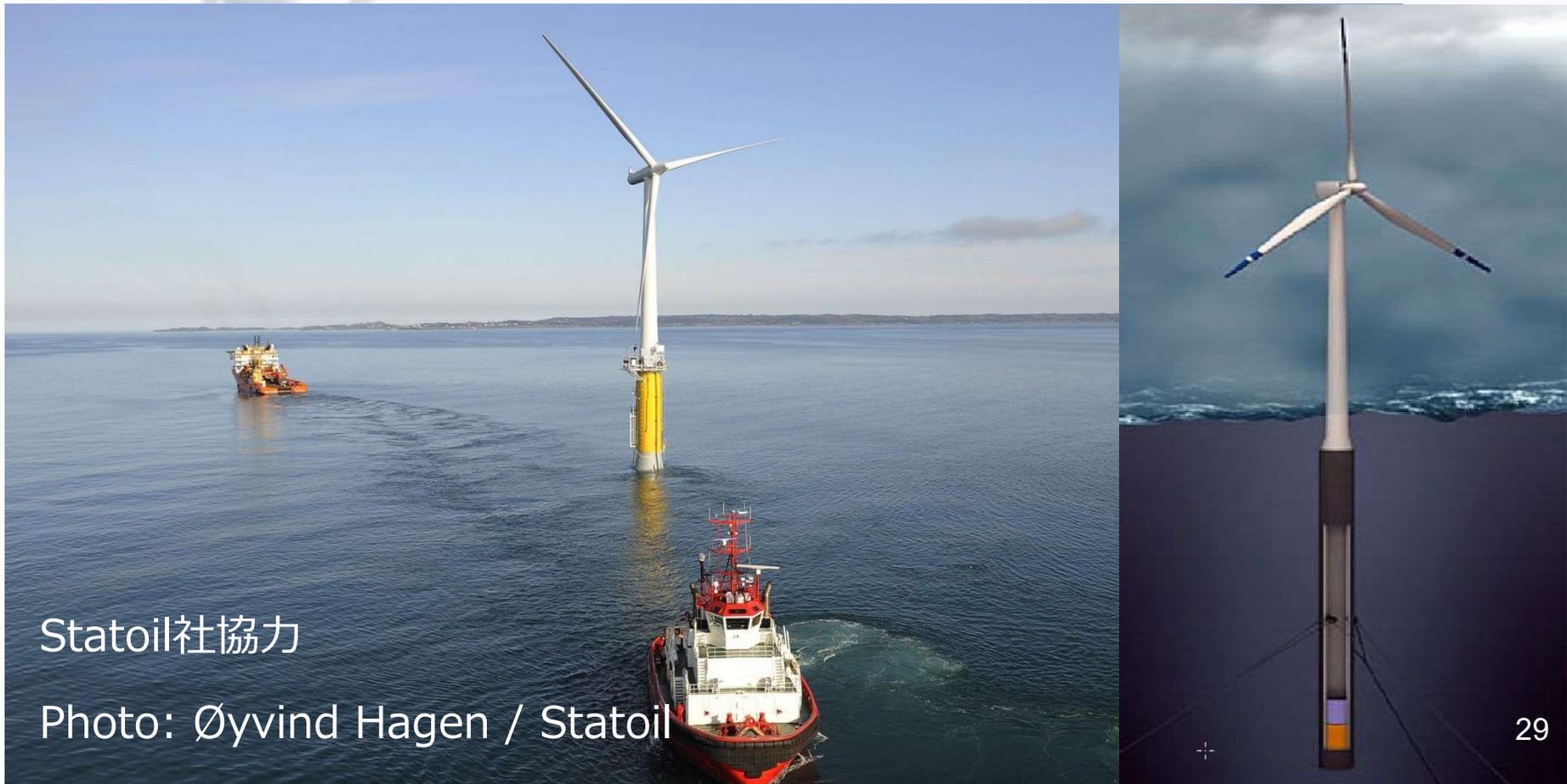
- 1) 小さなユニットの油圧機器の組み合わせ
- 2) 軽量発電機を利用可能
- 3) 将来の大容量への発展が容易

将来、超電導発電機との競争(?)



# 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

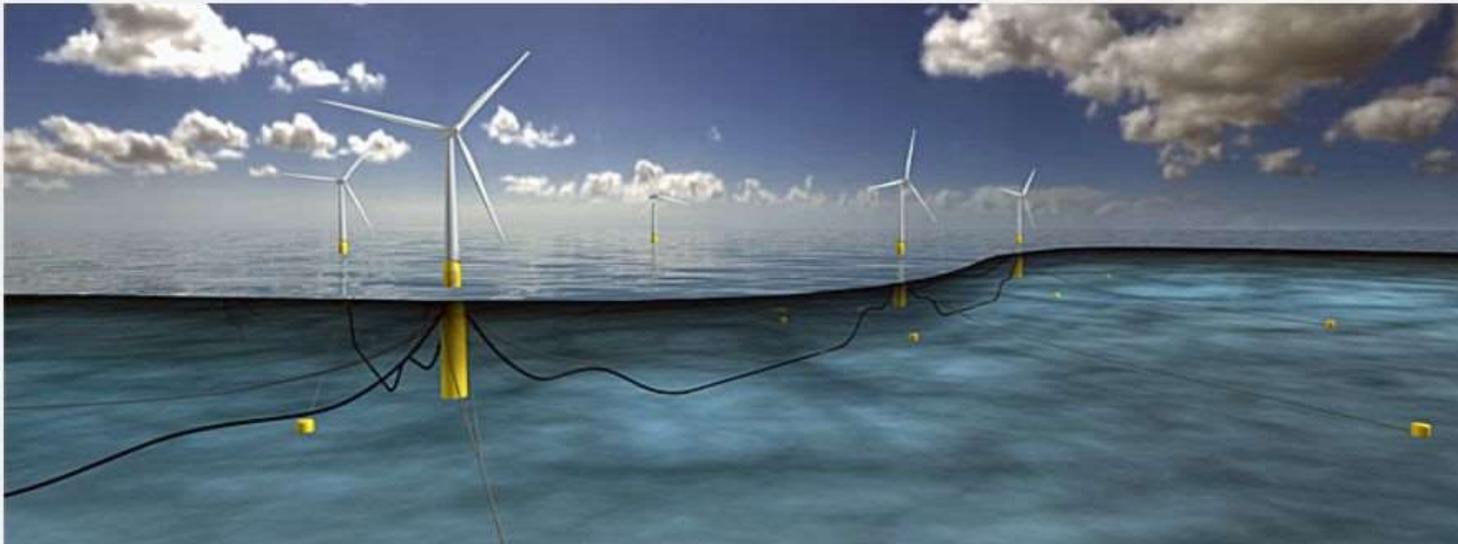
Photo: Øyvind Hagen / Statoil

# Hywind つづき (2017年運開)

## 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).

# 海外の浮体式洋上風車(2)



仏 FLOATGEN プロジェクト  
国内ではHIBIKI プロジェクト

コンクリート浮体で低廉なシステムへ

IDEOL 山田睦氏提供

# 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枚翼の採用



SCD<sup>®</sup> nezzy 8.0 MW

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

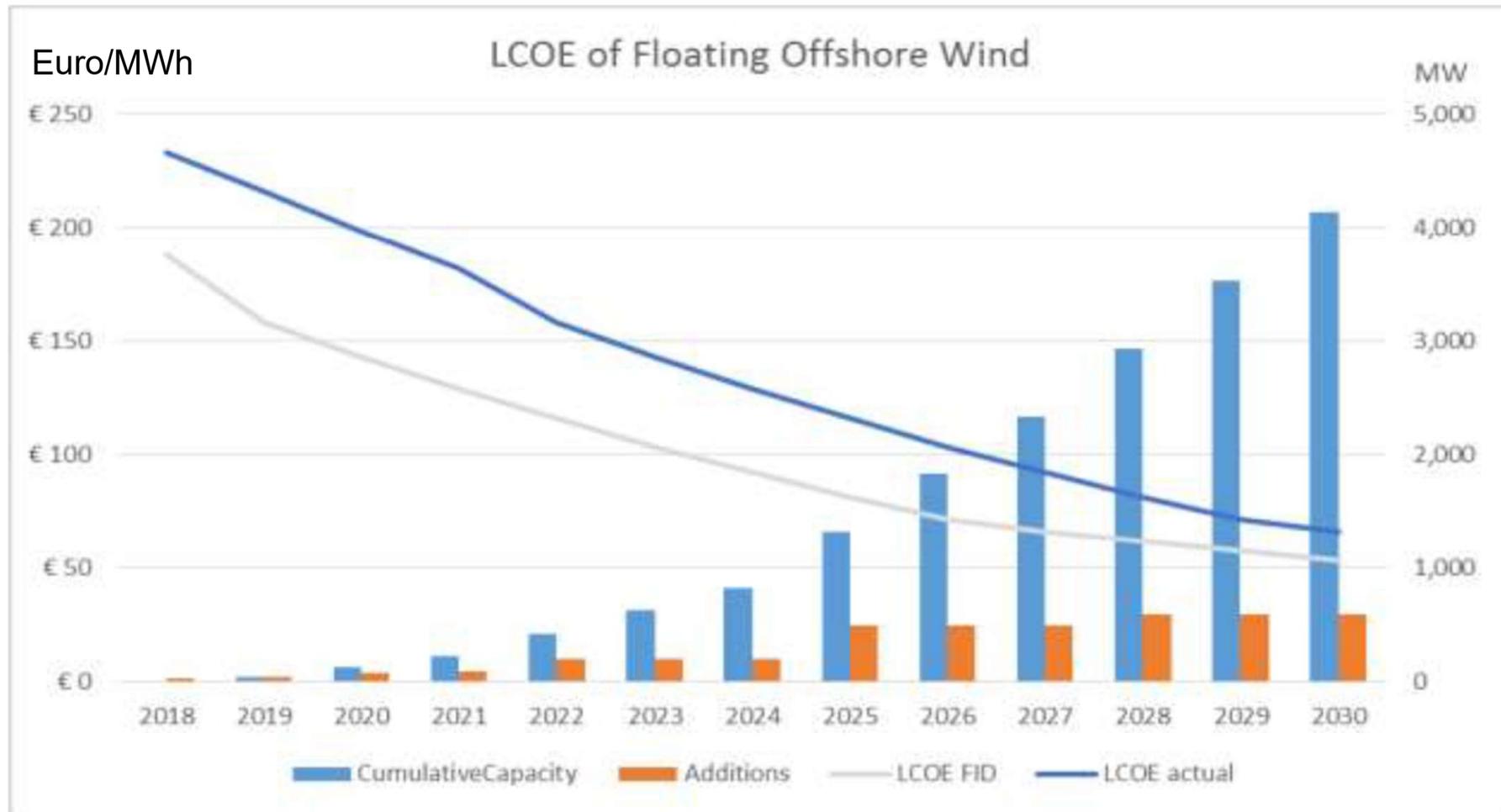
- concrete foundation design
- guided leaning profiled tower
- self-adjusting downwind rotor
- stabilised by 3 flexible floaters
- installation without crane ships



Source: Aerodyn HP

# 浮体式洋上風力発電コストの推移予想

Figure 3 - FOW cost reduction pathway



SOURCE: WindEurope "Floating Offshore Wind Energy, A Policy Blueprint for Europe (2018)"

2018年12月7日 京都大学寄附講座研究会

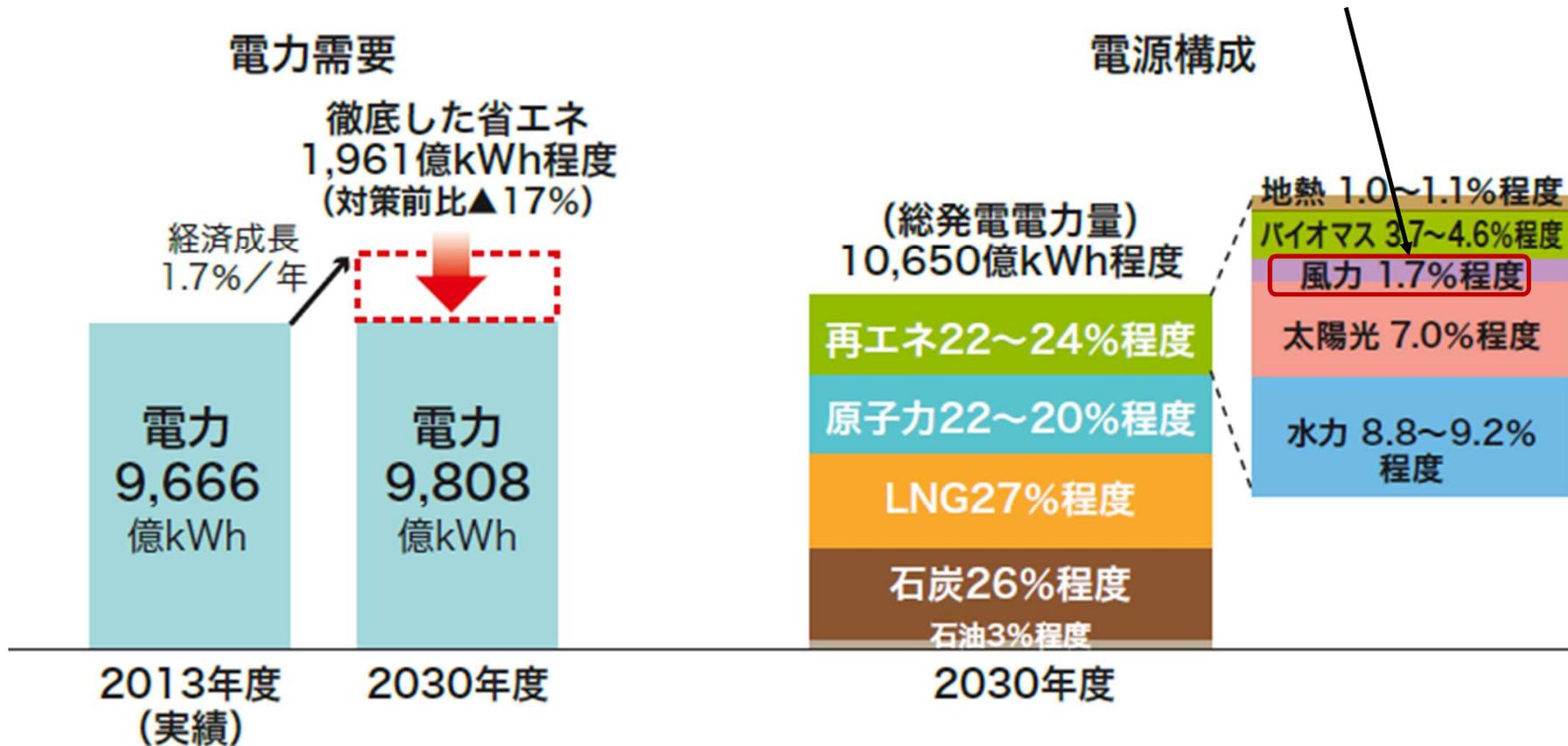
# 洋上風力発電の国内外の最新動向と 日本の探るべき方向性

京都大学特任教授・東京大学名誉教授  
荒川 忠一

1. 風力エネルギーの最新事情
2. 着底（着床）式洋上風力プロジェクト
3. 浮体式洋上風力プロジェクト
4. **日本の探るべき方向性**
5. 結語

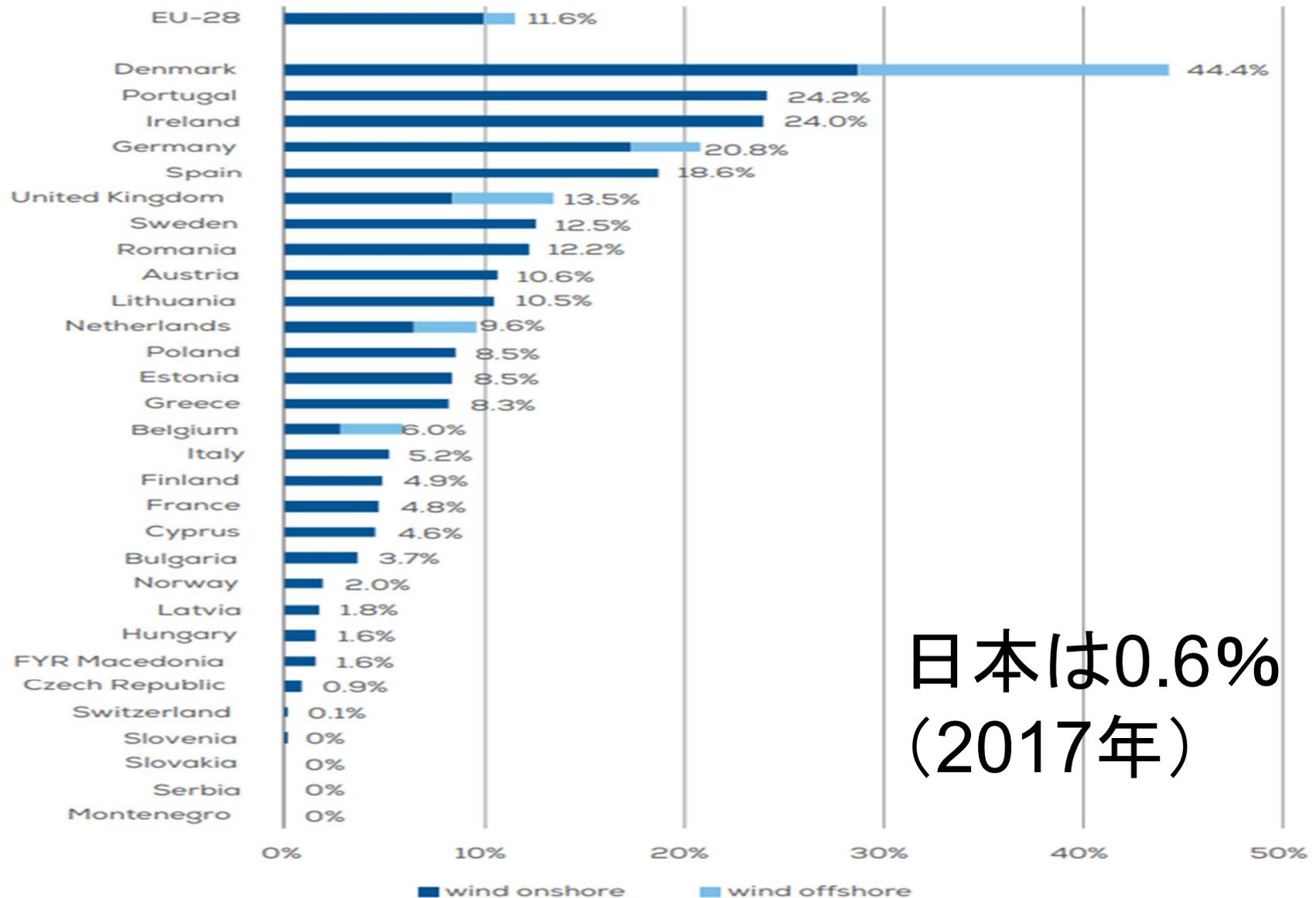
# 政府の2030年電力のベストミックス

**風力：1.7%**  
**あまりに小さい**  
**目標値！**



# 欧州の風力発電の電力比：陸上および海上

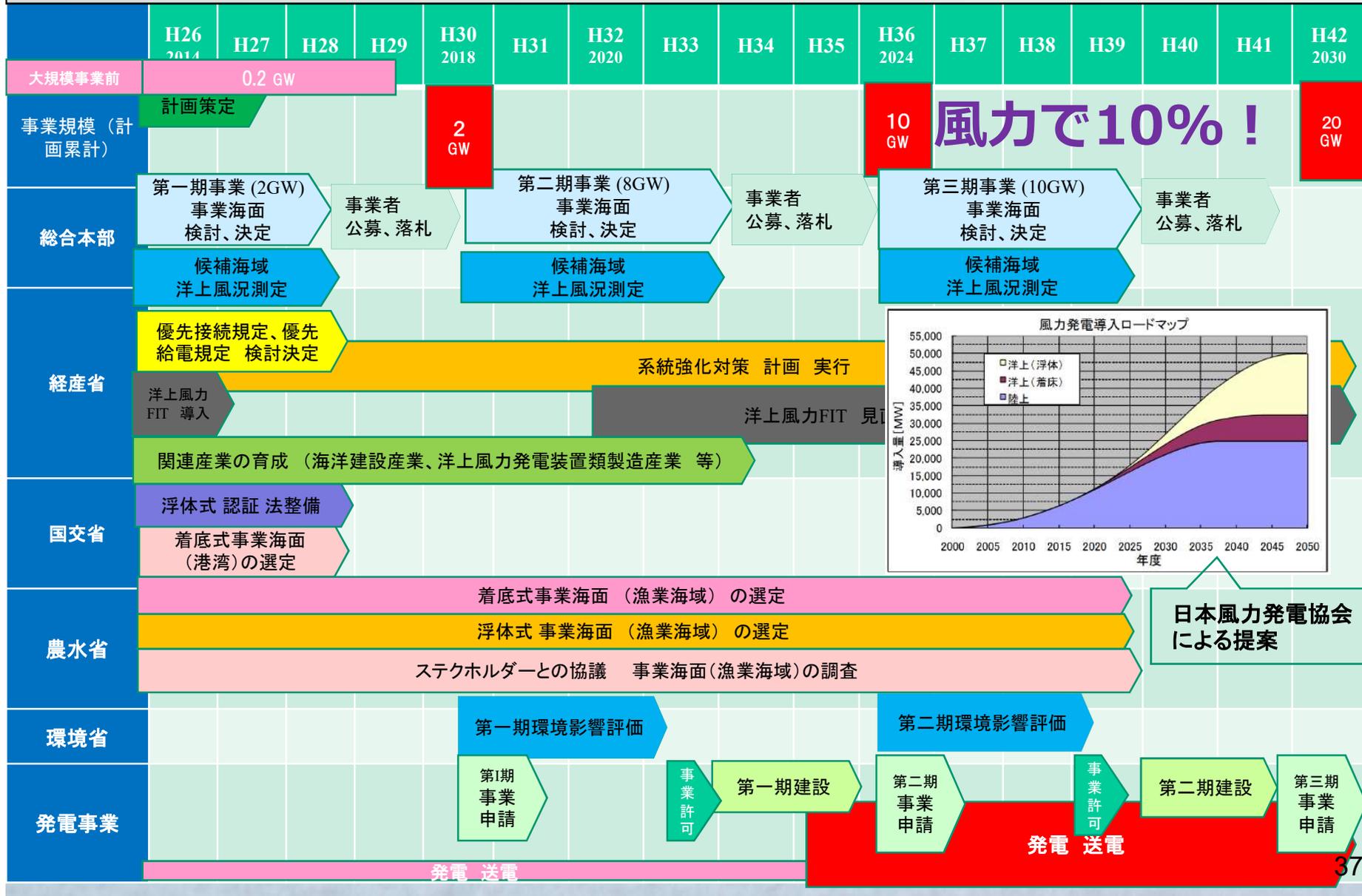
FIGURE 1  
Percentage of the average annual electricity demand covered by wind\*



日本は0.6%  
(2017年)

# 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 (H26年)



# 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
  - 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、その普及

政府の目標値

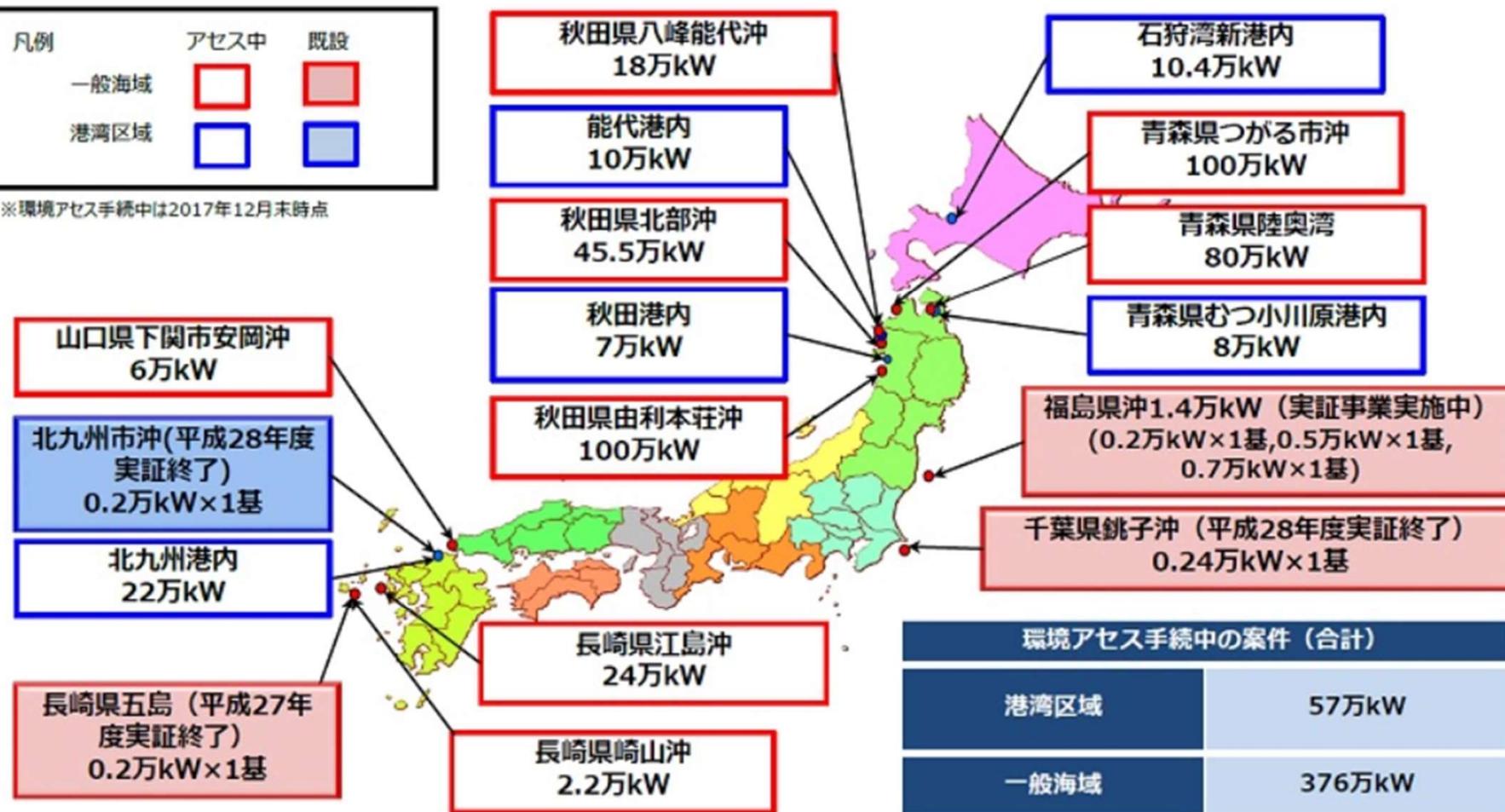
# 一般海域法案成立とその後

- 成立に漕ぎつけたことは大成功
- 海域の占有基準が明確になり、投資可能
- その他の具体的な方策が明確とは言えない
- 特に漁業者との交渉
- 売電料の一定割合の地域貢献
- その他のステークホルダーとの調整
- 防衛省・米軍との折衝
- 観光業との調整
- 海外事業者への門戸開放

# 国内の洋上ウィンドファームの計画

凡例	アセス中	既設
一般海域	<span style="border: 1px solid red; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	<span style="background-color: #f08080; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>
港湾区域	<span style="border: 1px solid blue; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	<span style="background-color: #add8e6; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>

※環境アセス手続中は2017年12月末時点



洋上風力の導入状況と計画

(出所: 資源エネルギー庁)

茨城県鹿島港沖、千葉県銚子沖、山形県遊佐町沖、岩手県洋野町沖などの計画発表が続く<sup>40</sup>

# 黒船はやってくる？

- 明治維新の黒船は脅威ではあったが、日本の近代化にプラスであった・・・
- 風力発電の導入が、日本では大幅に遅れている、つまり鎖国状態にある
- 電力システム、公共土木事業などの閉鎖性
- 欧州企業の注目が、台湾に続いて、日本に集まる
- 風車メーカー：これまでも海外企業が主流、さらにMHI-VESTAS
- 海洋土木：日本固有のルールがあり、海外事業者参入は困難？
- 欧州の大手風力発電事業者（黒船）は日本進出の機会を窺っている  
STATOIL、DONG、E.ON、EnBW、・・・・（旧名称を利用）

# 黒船を上手に受け入れる必要がある！

- 国際化によって、日本だけが受け入れを拒む理由がない  
欧州・台湾の洋上風力PJに日本企業も多数参加している
- 台風などの特異な気象条件は、情報を開示することにより、世界標準・基準を作成可能であり、世界の他の地域への貢献も大きい
- 政府として、再生可能エネルギー、風力発電をどこまで受け入れる計画とするかがポイントとなる  
風力発電、2030年電力比10%の目標が必要(30+20=50GW)
- 洋上風力発電の単位はGWとなりつつあり、大規模計画を受け入れる必要がある
- 地域や漁業関係者とのインターフェイス、地域協調が必須である  
(用語としての「セントラル方式」は不適切)

## 6. 結語

- 風力は再生可能エネルギーのトップランナー
- 無限の可能性があり、経済性で魅力ある洋上風力へ
- 地域との連携、地域の発展、漁業協調を重要課題に設定
- 大きな風力ロードマップのもとにエネルギー政策を
- 国際的な共同開発のモデルケースの構築も必要
- 世界の全エネルギーを再生可能エネルギーで賄おう！
  - RE100への参加表明など、意思表示が必要では？
  - RE100の実現期限は明示されていない