次の主役･洋上風力

-欧州が牽引する新産業-

京都大学再エネ経済学講座主催シンポジウム
プレゼン資料

２０１７年２月８日

京都大学特任教授　山家公雄

目　　次

序.デンマークの洋上風力発電

１. 洋上風力の常識

２. 欧州にみる洋上風力情勢

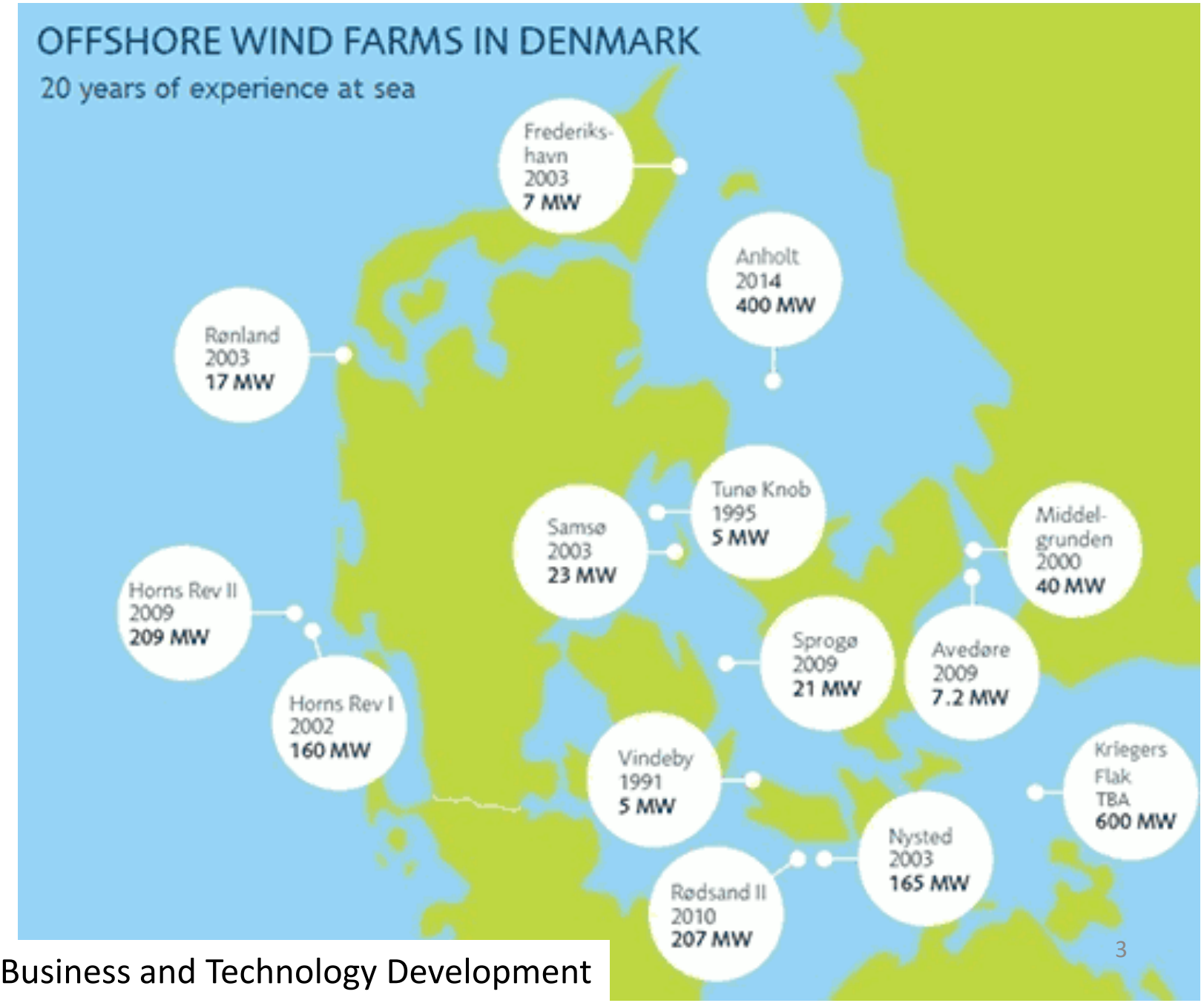
３. 洋上風力発電所開発の経緯とトレンド

４. 2016年オークション価格の衝撃

５. 洋上風力コスト削減と産業化

まとめ

序. デンマークの洋上風力発電GmbH



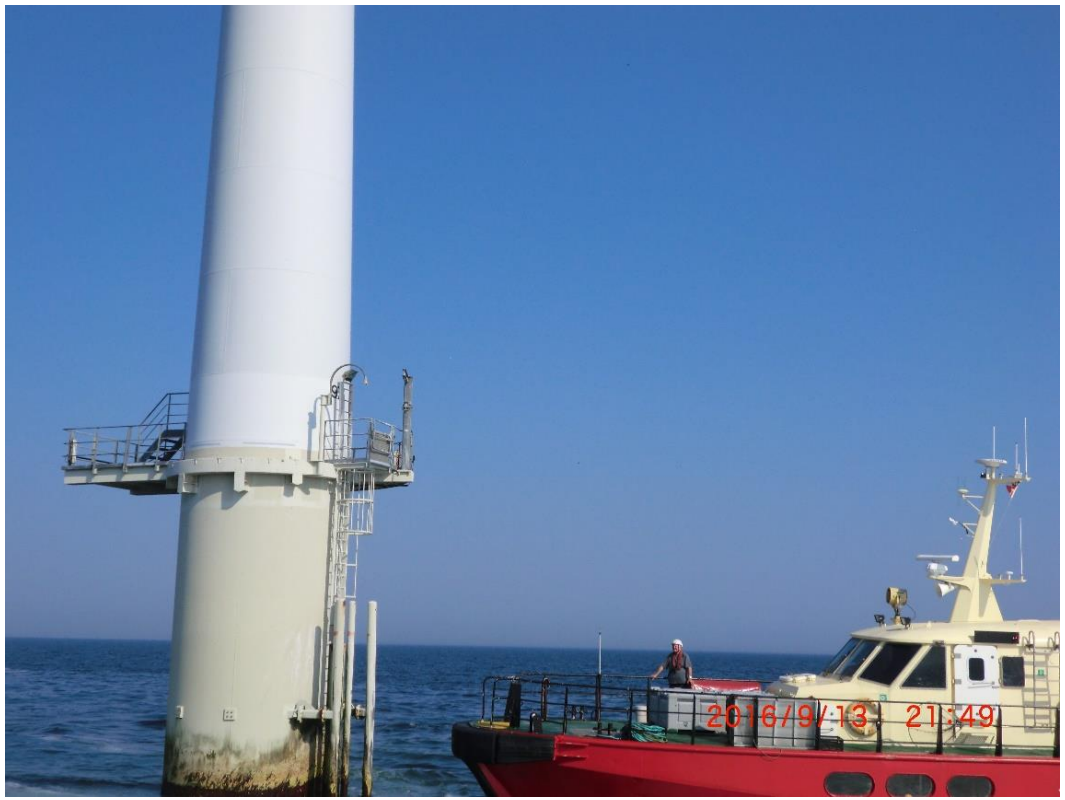
（出所）Rostock Business and Technology Development

ホーンズリーフ1洋上発電所

【Horns-Rev1】
-最初の大規模洋上発電所-
・総出力：160MW
・タービン：2MW×80（MHI-Vestas）
・位置：沖合14~20km、水深6~14m
・事業者：ﾊﾞｯﾃﾝﾌｫｰﾙ6、ﾄﾞﾝｴﾅｼﾞｰ-4
・運転開始：2002年

（出所）山家撮影（9/13/2016）

ホーンズリーフ1洋上発電所



（出所）山家撮影（9/13/2016）

ホーンズリーフ母港に浮かぶSEP船

（出所）山家撮影（9/13/2016）

ホーンズリーフ事業対岸の港湾

（出所）山家撮影（9/13/2016）

アンホルト洋上発電所

【Anholt】
・総出力：400MW
・CF：49%
・タービン：3.6MW×111（シーメンス）
・位置：沖合21km、水深14~17m
・事業者：ドンエナジー
・運転開始：2013年

（出所）山家撮影（9/14/2016）

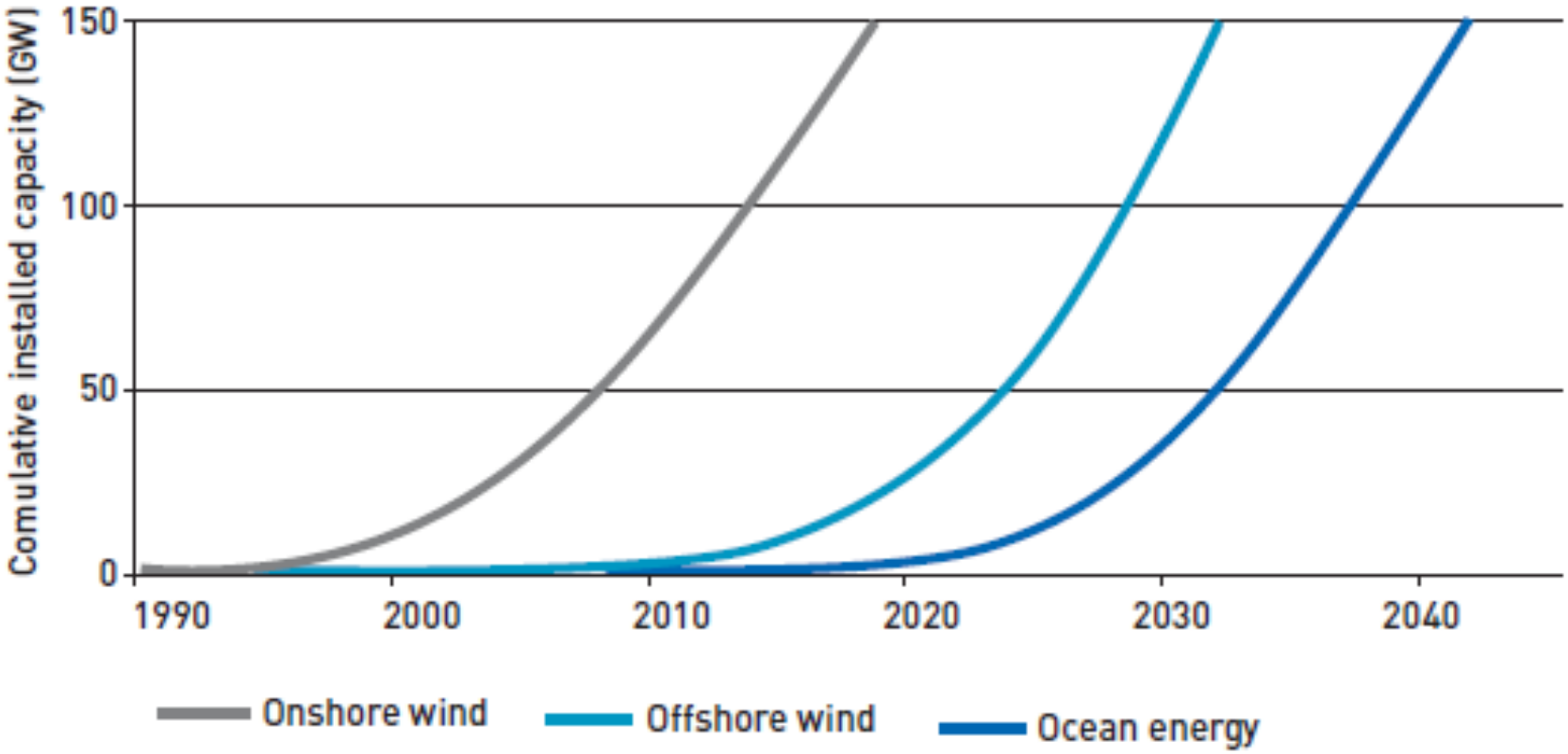
アンホルト洋上発電所

（出所）山家撮影（9/14/2016）

１．洋上風力の常識

- ポテンシャルがあり、大規模開発が可能で、再エネ普及への期待が大きい。
  - *騒音、景観等の問題は小さい
- 一方、沖合展開はコストがかかり、普及に時間を要する。
  - *着床式２倍、浮体式３倍
  - *沖合での作業が容易でない
- 陸上風力、太陽光の次に来て、海洋エネルギーに繋がる技術。
- ソリューションは大規模開発、大型化で「母港」を中心とた「産業化」が不可欠（期待）。

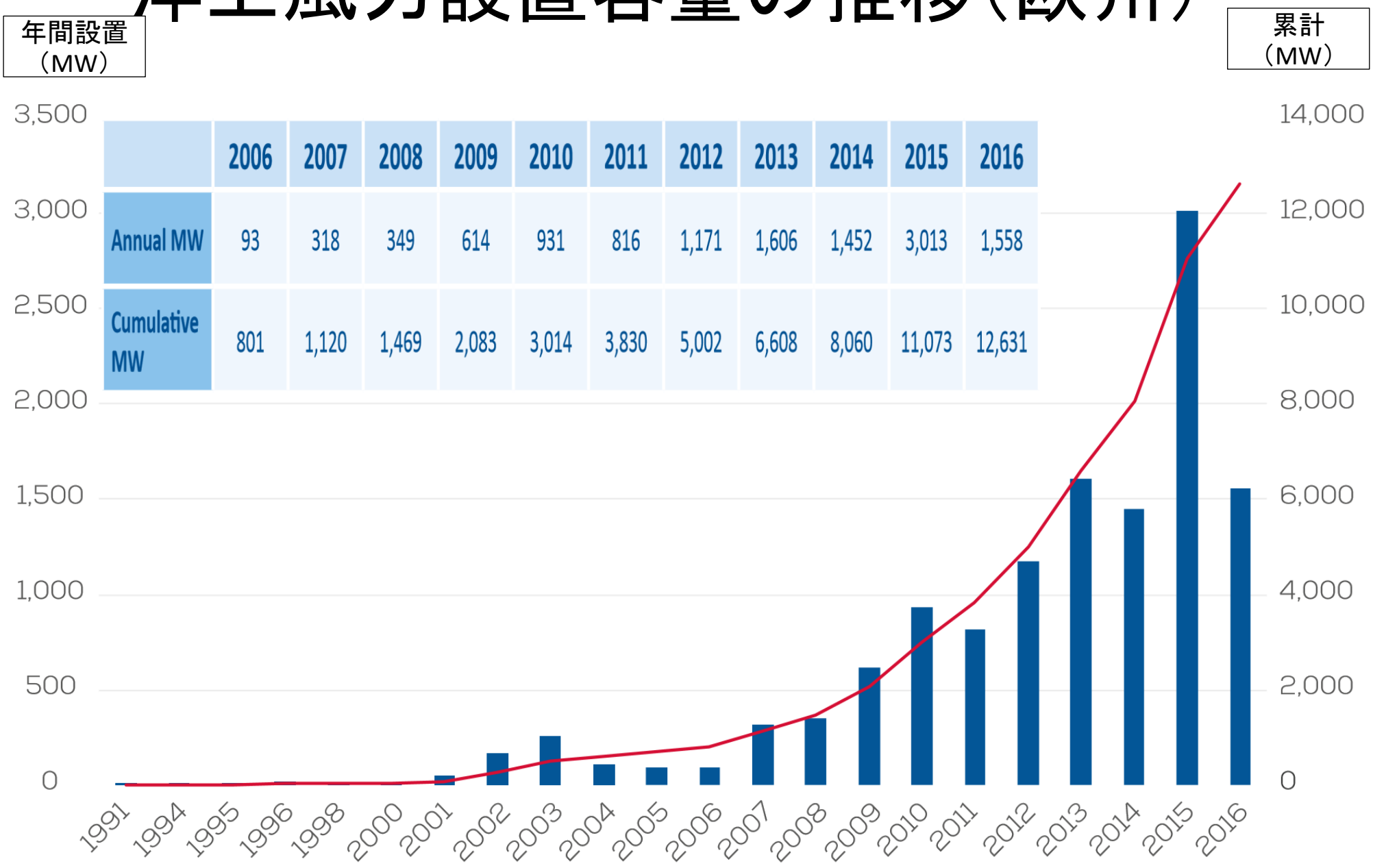
陸上風力、洋上風力、海洋エネルギーの設置予想



（出所）EU-OEA. European Ocean Energy Roadmap 2010-2050（2010年）

２．欧州にみる洋上風力情勢

洋上風力設置容量の推移（欧州）

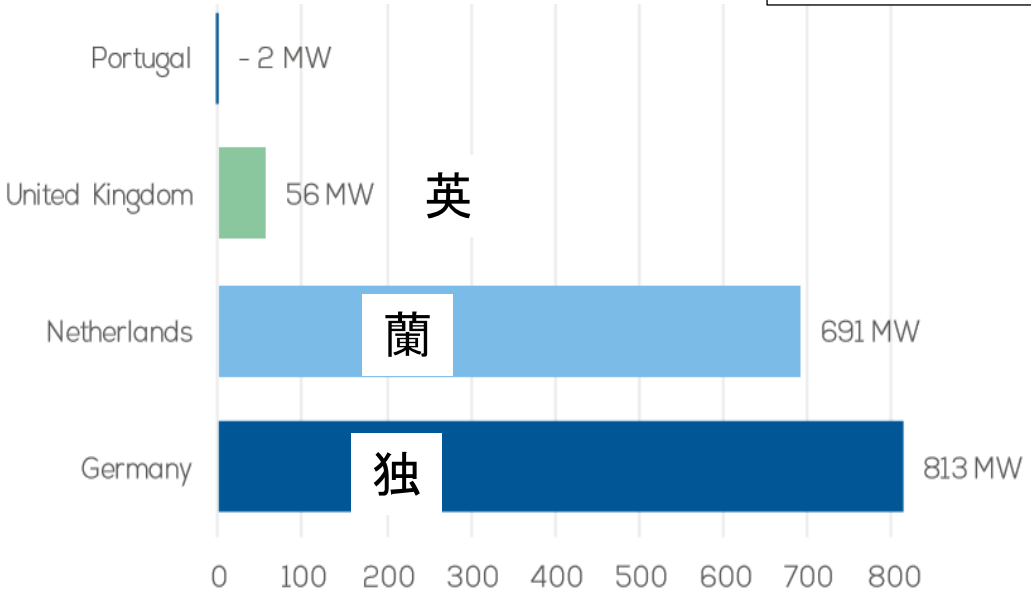


	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Annual MW	93	318	349	614	931	816	1,171	1,606	1,452	3,013	1,558
Cumulative MW	801	1,120	1,469	2,083	3,014	3,830	5,002	6,608	8,060	11,073	12,631

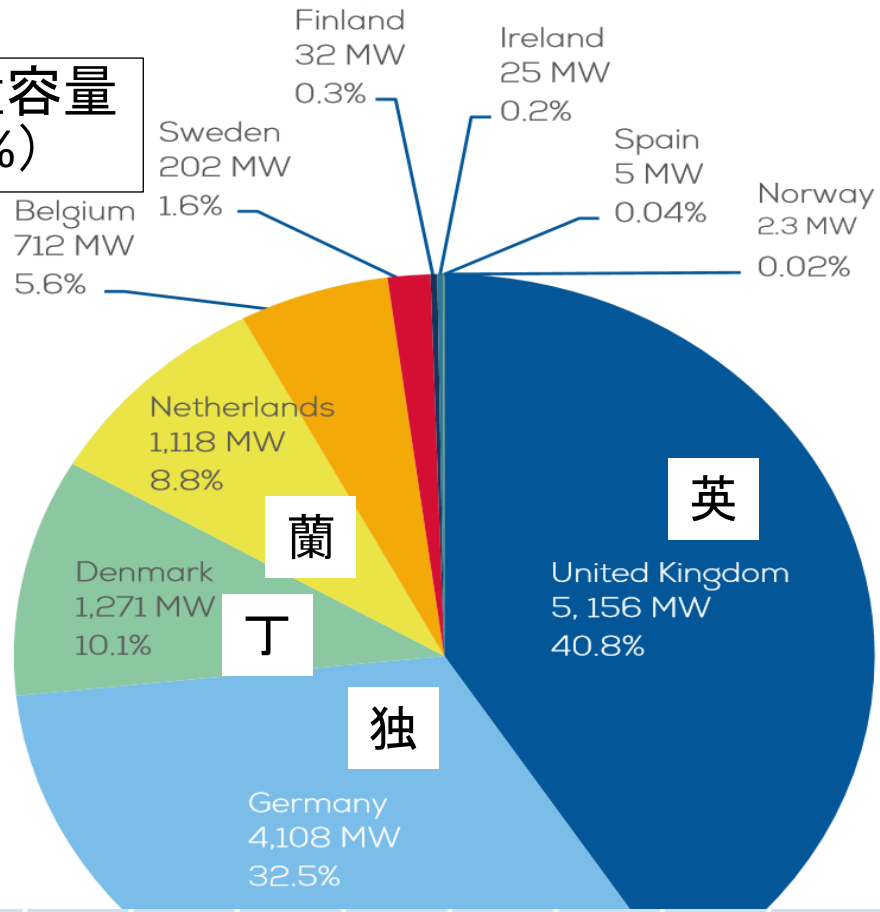
（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

国別洋上風力発電シェア（欧州）

2016年設置容量（単年、%）



2016年設置容量（累計、%）

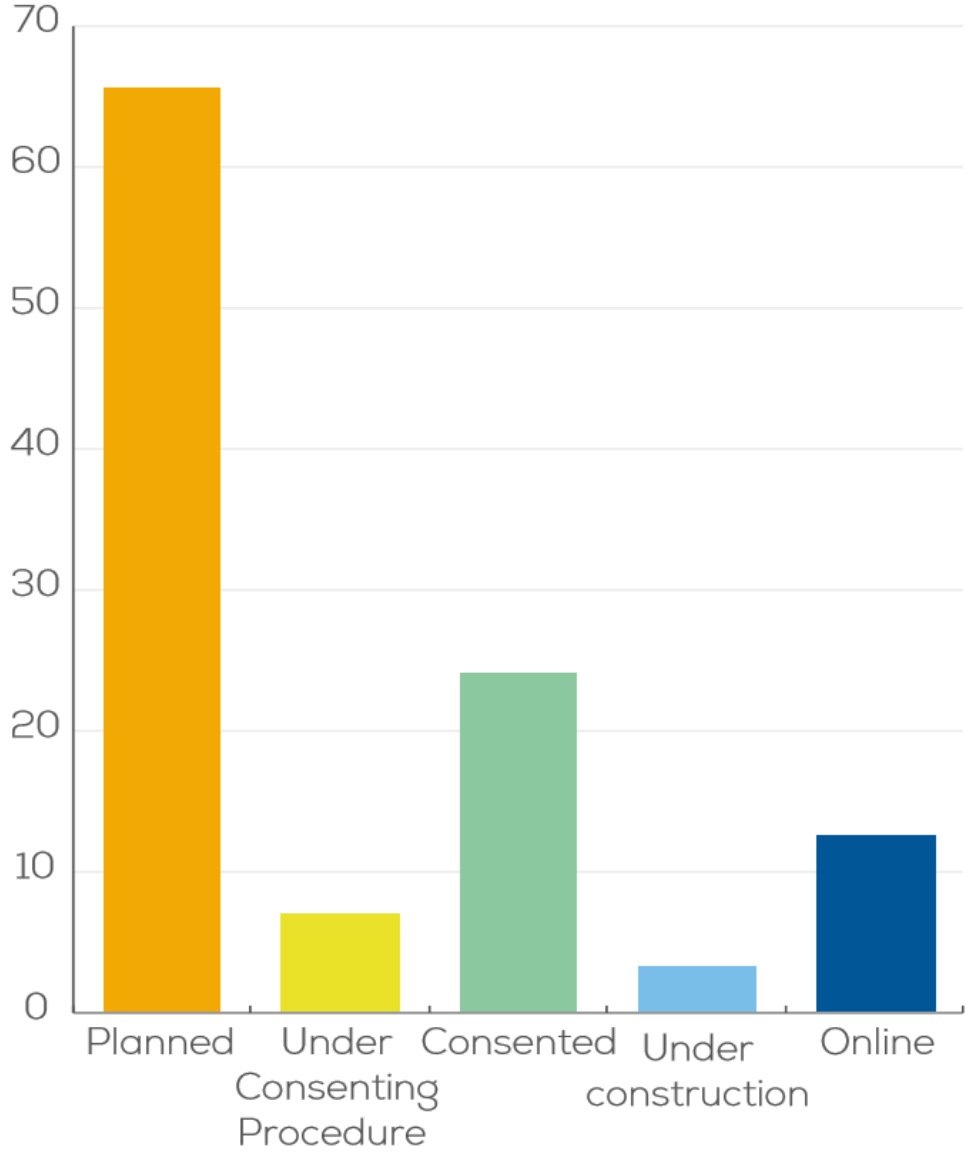


COUNTRY	BE	DK	DK	ES	FI	IE	NL	NO	SE	UK	TOTAL
Country	BE	DE	DK	ES	FI	IE	NL	NO	SE	UK	Total
No. of Farms	6	18	13	1	2	1	6	1	5	28	81
No. of turbines connected	182	947	517	1	11	7	365	1	86	1,472	3,589
Capacity Installed	712 MW	4,108 MW	1,271 MW	5 MW	32 MW	25 MW	1,118 MW	2 MW	202 MW	5,156 MW	12,631 MW

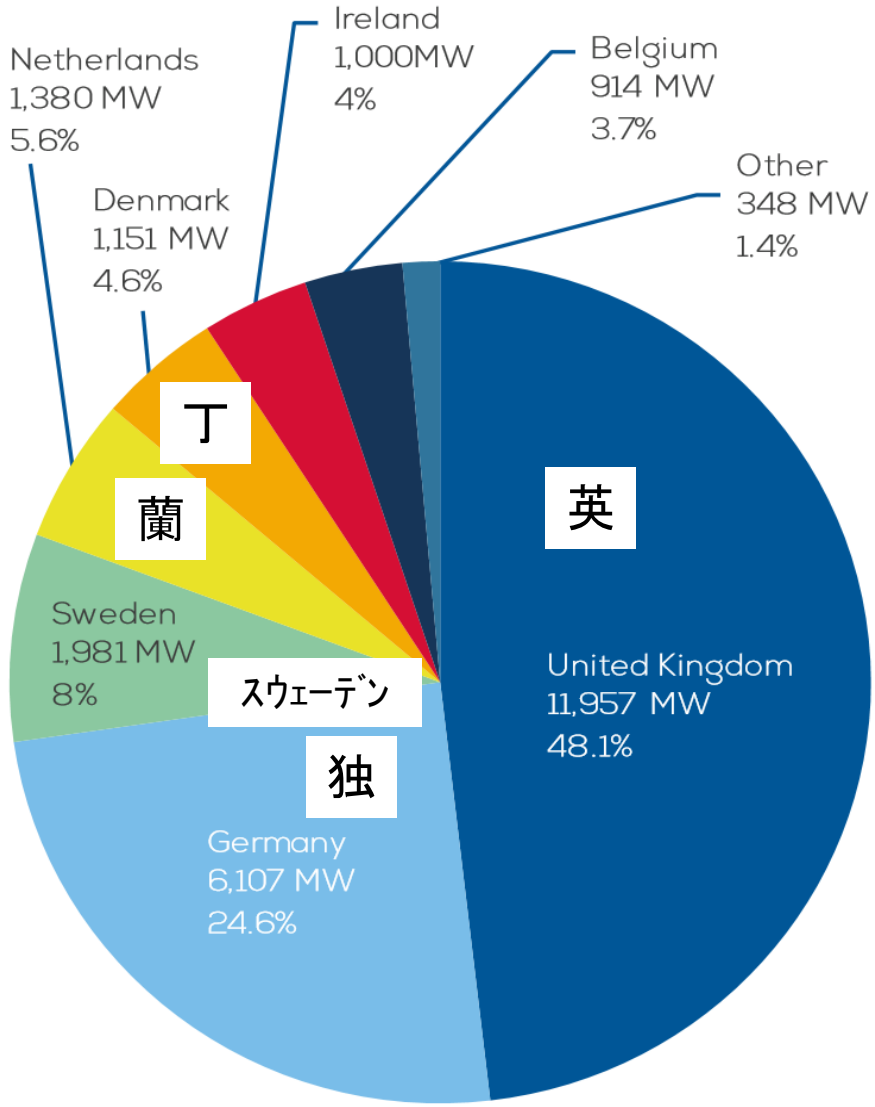
（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

洋上風力市場（接続、認可、計画）

単位：GW



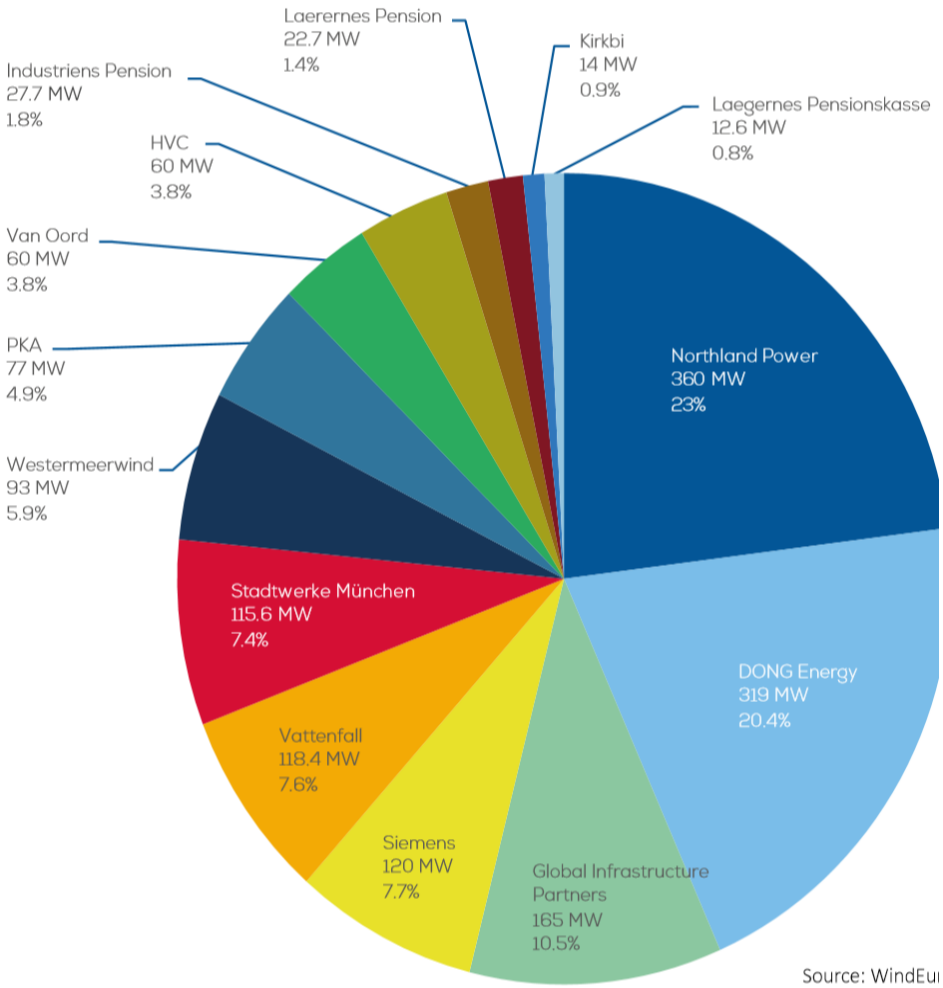
認可済み（consented）事業の国別シェア
（2016年末時点）



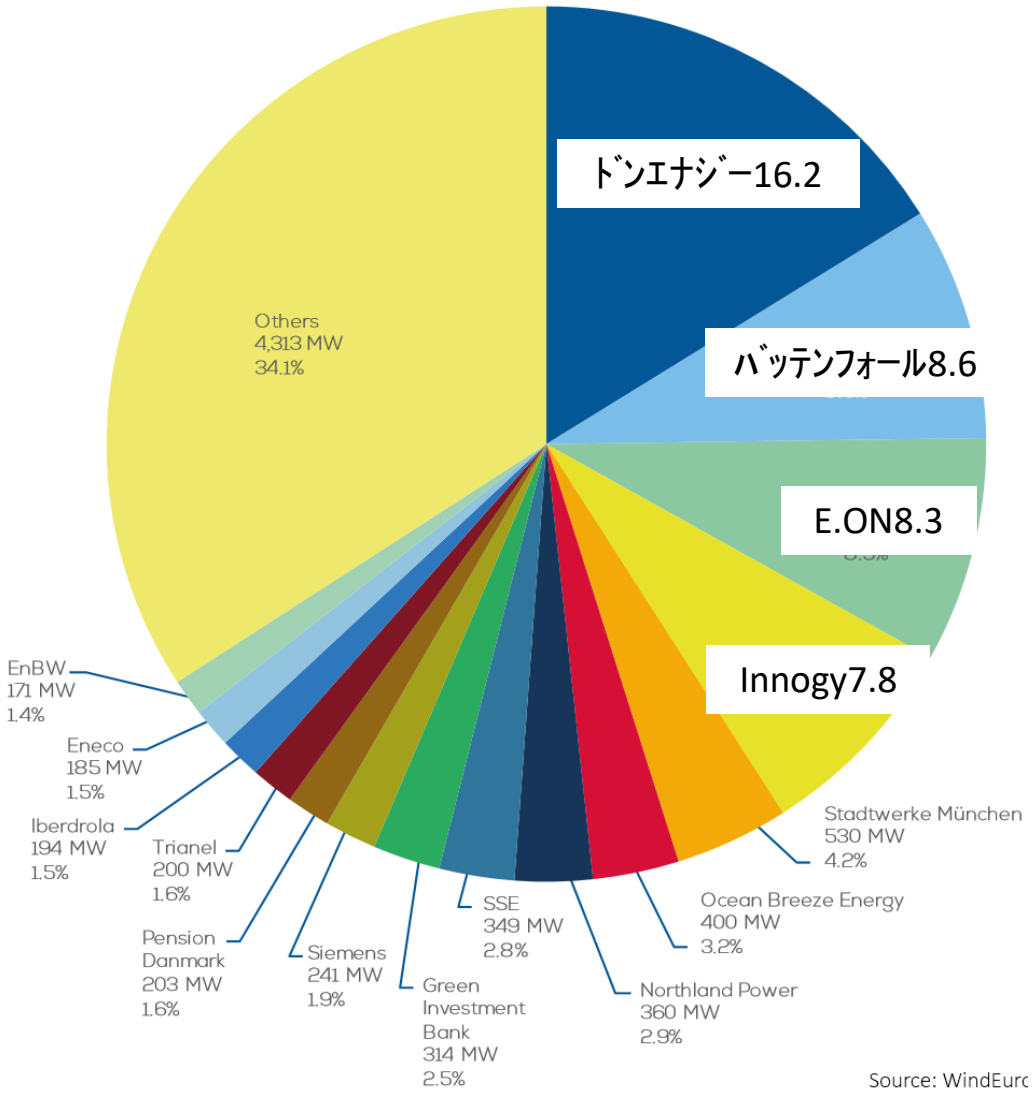
（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

デベロッパー（オーナー）のシエア

2016年設置容量（単年、%）



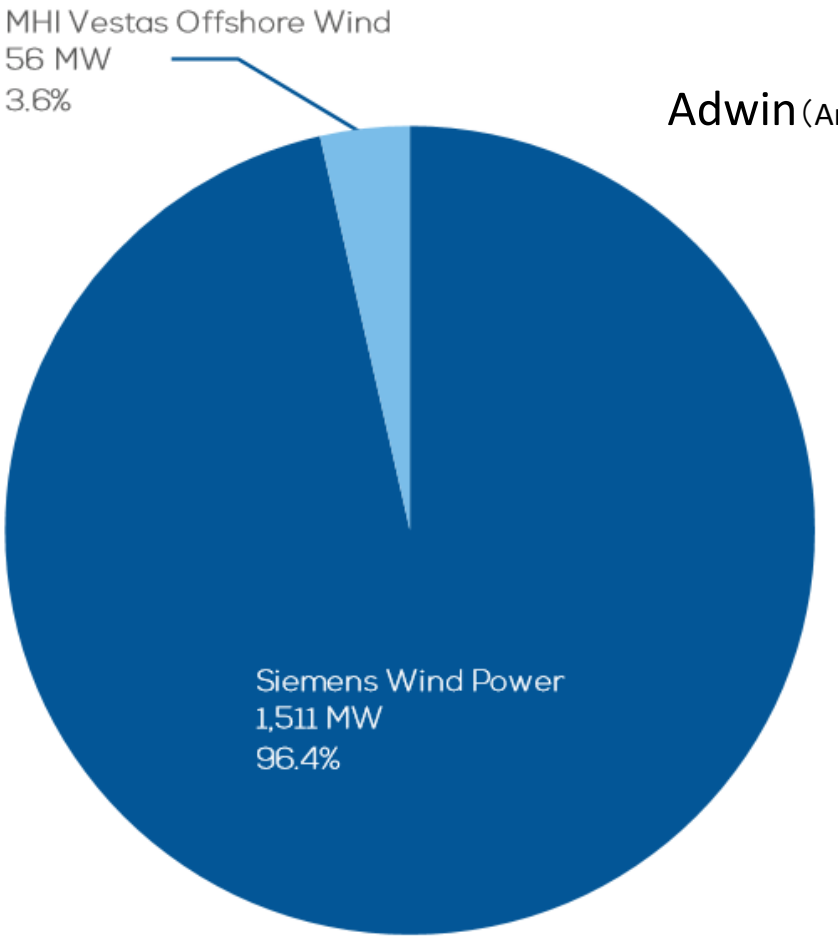
2016年設置容量（累計、%）



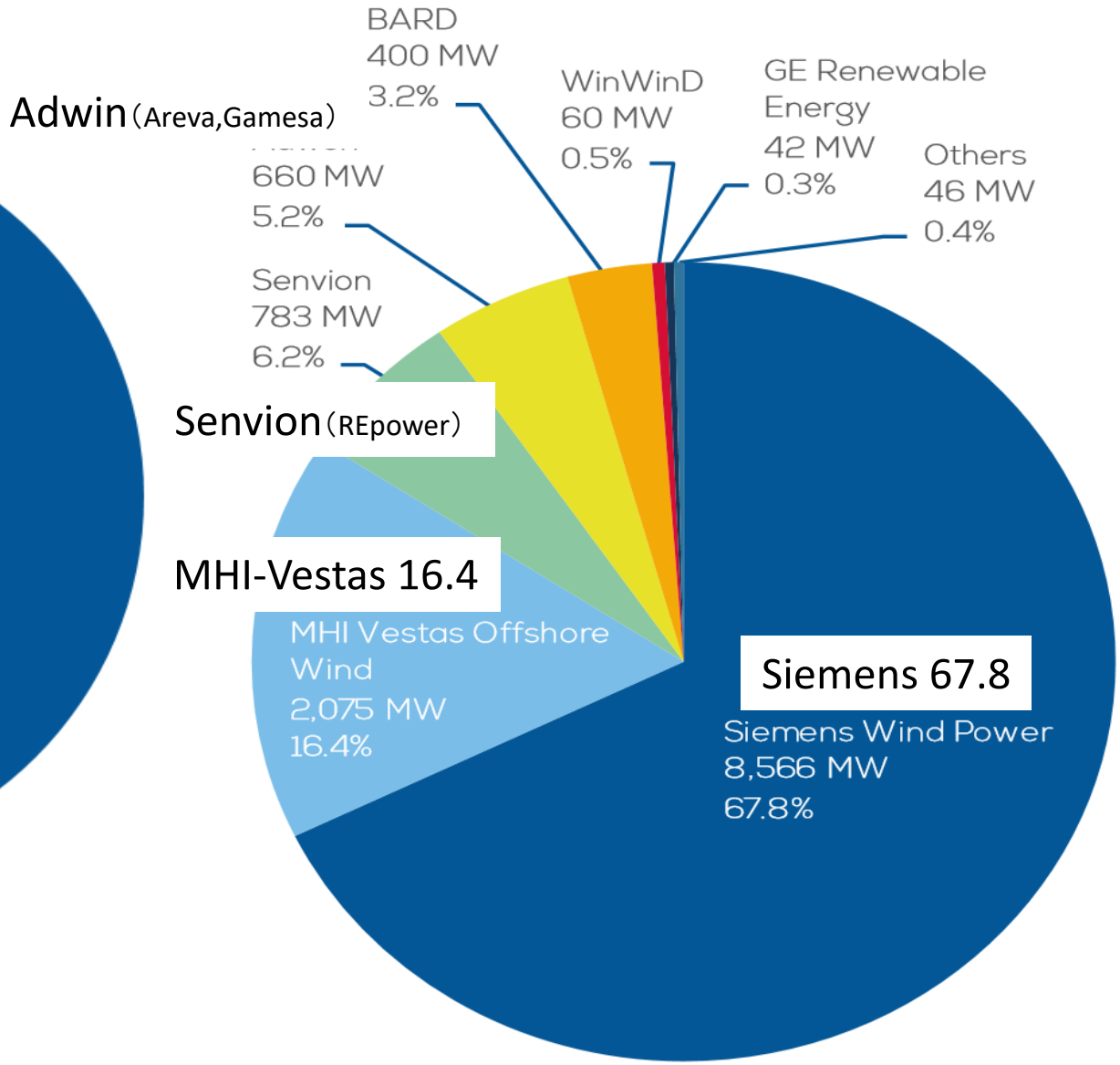
（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

風車メーカーのシェア

2016年設置容量（単年、%）

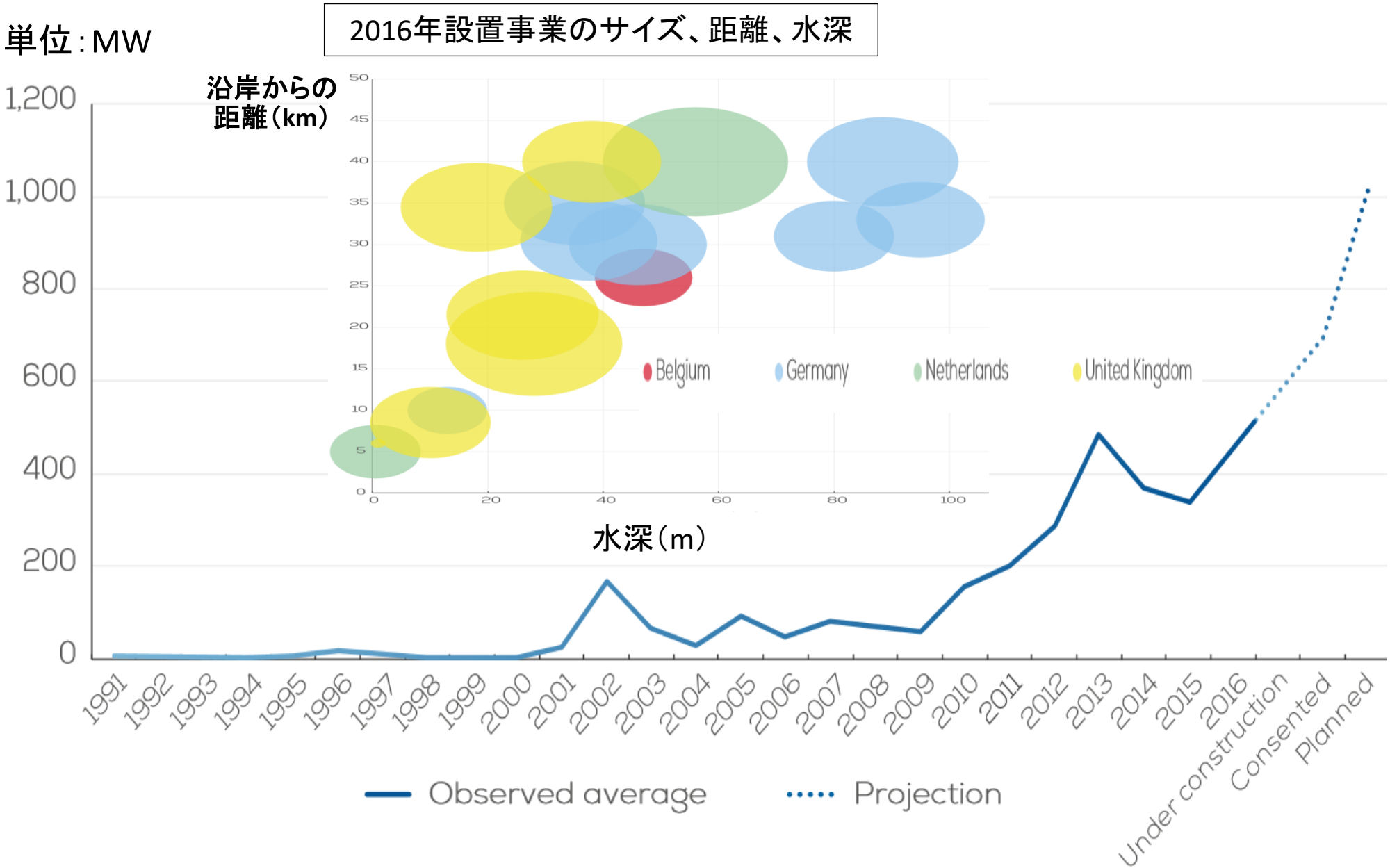


2016年設置容量（累計、%）



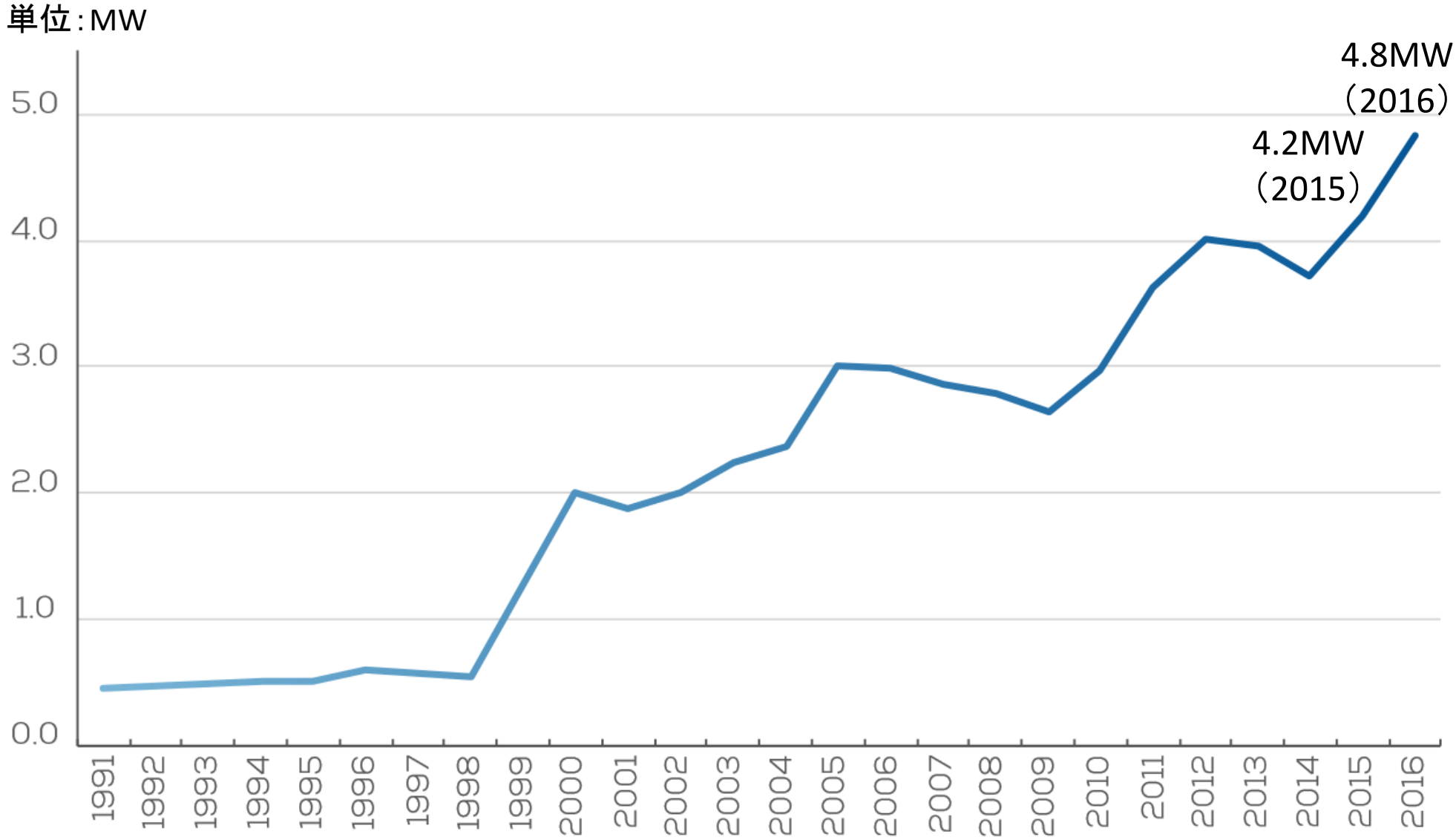
（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

洋上風力事業の平均サイズの推移（MW）



（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

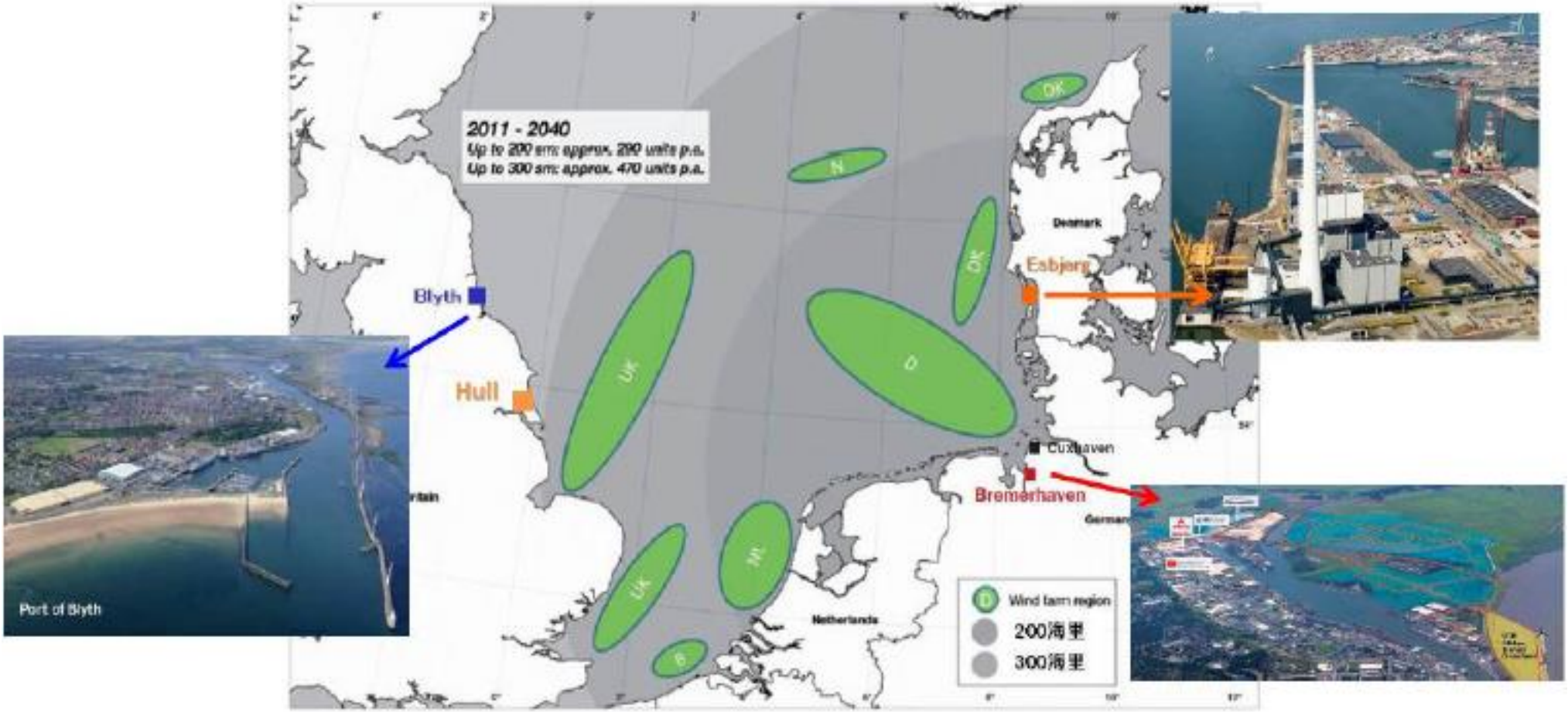
1基当り平均洋上風車容量の推移（累計、欧州）



（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

洋上風力のゾーニングと港湾整備：欧州の事例

- 洋上風力に係る企業、研究所、大学等の集約化が欧州各国の港湾で展開
- イギリスBlyth、ドイツBremerhaven、デンマークEsbjergは代表的な港湾
- 洋上ウィンドファームの大規模化、洋上風車や基礎の大型化に伴い、産官による、更なる港湾整備の計画が進められている（ドイツCuxhaven、イギリスHull等）



出典：BIS Economic Development Company Ltd. "OFFSHORE TERMINAL BREMERHAVEN（2011）"など

（出所）日本風力学会副会長、三保谷明氏

新港湾都市ブレーマーハーフェン

（出所）**秋田県議会議員　北林丈正氏　ブログ（2012/9/12）**

洋上風力の動向

・再エネが普及している欧州で先行し9割を占める

*デンマーク、英国、ドイツ、オランダ等10ヶ国

*北海、バルト海、アイリッシュ海

*ドンエナジー、バッテンフォール、E-On

Innogy（RWE）、シェル、スタトオイル

*シーメンス、MHIヴェスタス、Adwin

・ここ数年で急激に増加：2015/10で4倍

・オランダ・デンマークで驚異的な低価格事業出現

・中国、米国、台湾、韓国、日本等が続く

・これからの再エネとして期待が膨らむ

３．洋上風力発電所開発の経緯とトレンド

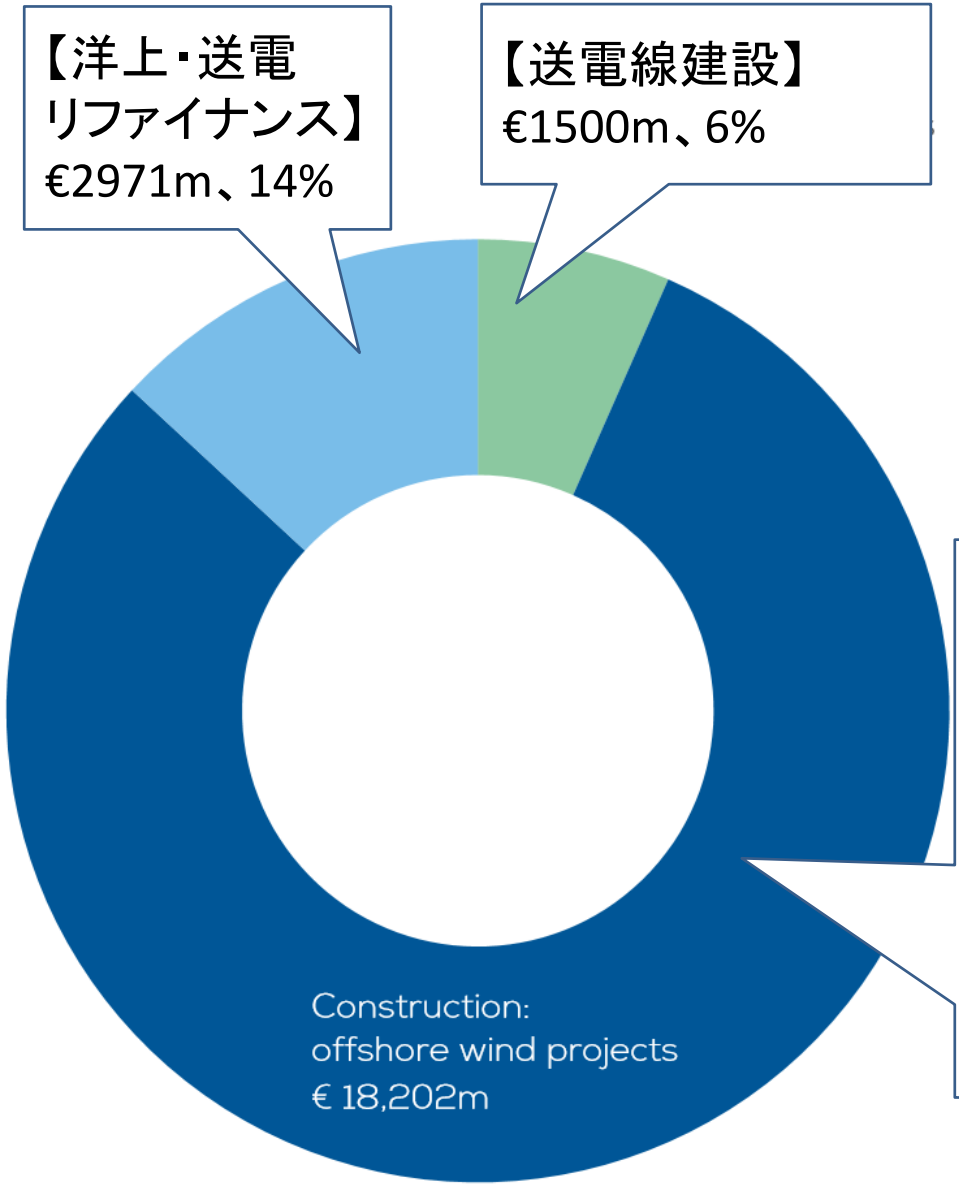
洋上風力発電事業一覧①

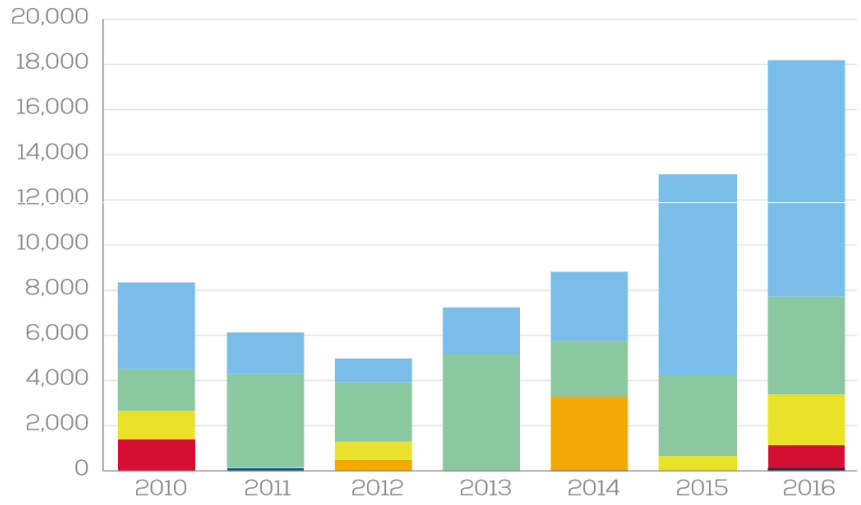
Year of commissioning	Country	Project name	Project capacity (MW)	Individual turbine rating (MW)	Average water depth (m)	Average distance from port (km)	Average wind speed (m/s)
2001	DK	Middlegrunden	40	2	4.5	3	7.8
2002	DK	Horns Rev 1	160	2	17	30	9.9
2003	DK	Samsø	23	2.3	12	8	9.0
2003	DK	Rødsand I (Nysted)	165.6	2.3	7	20	9.0
2003	UK	North Hoyle	60	2	12	18	8.8
2004	UK	Scroby Sands	60	2	7.5	8	9.1
2005	UK	Kentish Flats	90	3	5	9	8.8
2006	UK	Barrow	90	3	18	13	9.8
2007	NL	Egmond aan Zee	108	3	6	30	9.8
2007	SE	Lillgrund	110.4	2.3	6	1	9.0
2007	UK	Burbo Bank	90	3.6	5	15	8.9
2008	BE	Thornton Bank 1	30	5	28	30	10.2
2008	NL	Prinses Amaliawindpark	120	2	22	30	9.9
2008	UK	Inner Dowsing	97.2	3.6	18	60	9.3
2008	UK	Lynn	97.2	3.6	18	60	9.3
2009	DK	Horns Rev 2	209.3	2.3	18	30	9.9
2009	UK	Gunfleet Sands	108	3.6	8	20	9.1
2009	UK	Gunfleet Sands 2	64.8	3.6	13	21	9.2
2009	UK	Rhyl Flats	90	3.6	9.5	31	8.6
2009	UK	Robin Rigg East	90	3	10	14	9.5
2010	BE	Bligh Bank (Belwind) Phase I	165	3	26	40	10.2
2010	CH	Donghai Bridge	102	3	7	4	7.5
2010	DK	Rødsand II	207	2.3	9	9	9.0
2010	UK	Robin Rigg West	90	3	10	14	9.5
2010	UK	Thanet	300	3	22.5	13	9.4
2011	CH	Rudong Intertidal 1A	102	2.3	4.5	4	7.5
2011	CH	Rudong Intertidal 1B	48.3	3	4.5	4	7.5
2011	DE	Baltic 1	48.3	2.3	17	16	8.8
2011	DE	Bard 1	400	5	40	87	10.0
2011	UK	Greater Gabbard	504	3.6	29	62	9.8
2011	UK	Ormonde	150	5	19.5	24	9.8
2011	UK	Sheringham Shoal	316.8	3.6	19	26	9.7

洋上風力発電事業一覧②

Year of commissioning	Country	Project name	Project capacity (MW)	Individual turbine rating (MW)	Average water depth (m)	Average distance from port (km)	Average wind speed (m/s)
2011	UK	Walney 1	183.6	3.6	26	34	10.0
2011	UK	Walney 2	183.6	3.6	26	34	10.1
2012	BE	Thornton Bank 2	147.6	6.15	20	28	10.2
2012	CH	Rudong Intertidal 2A	50	2.5	4.5	4	7.5
2012	CH	Rudong Intertidal Extension	60	2.5	4.5	4	7.5
2012	DK	Djursland Anholt	399.6	3.6	17	18	8.8
2012	UK	Lincs	270	3.6	13	58	9.3
2012	UK	London Array 1	630	3.6	13	40	9.5
2012	UK	Teesside	62.1	2.3	11	7	8.2
2013	BE	Thornton Bank 3	147.6	6.15	20	28	10.2
2013	DE	Meerwind Ost/Sud	288	3.6	24	23	9.8
2013	SE	Kårehamn	48	3	22.5	9	8.7
2013	UK	Gwynt y Môr	576	3.6	23	28	9.2
2014	BE	Northwind (Bank zonder Naam/ Eldepasco)	216	3	21	37	10.2
2014	DE	Borkum Riffgat	108	3.6	18	14.5	9.9
2014	DE	Borkum West II phase 1 (Trianel)	200	5	30	65.6	9.9
2014	DE	Butendiek	288	3.6	19	34	10.0
2014	DE	Dan Tysk	288	3.6	27	70	10.0
2014	DE	Global Tech 1 1	200	5	32	77	10.0
2014	DE	Global Tech 1 2	200	5	40	77	10.0
2014	DE	Nordsee Ost	295.2	6.15	23.5	38	9.8
2014	UK	West of Duddon Sands	388.8	3.6	18.5	28	10.0
2015	DE	Amrumbank West	288	3.6	23	40	9.8
2015	DE	Baltic 2a (previously Kriegers Flak 1)	140.4	3.6	30	32	8.8
2015	DE	Borkum Riffgrund 1	312	4	26	34	9.9
2015	UK	Humber Gateway	219	3	14.5	42	9.5
2015	UK	Westermost Rough	210	6	20	36	9.5

2016年の洋上風力関連事業投資額





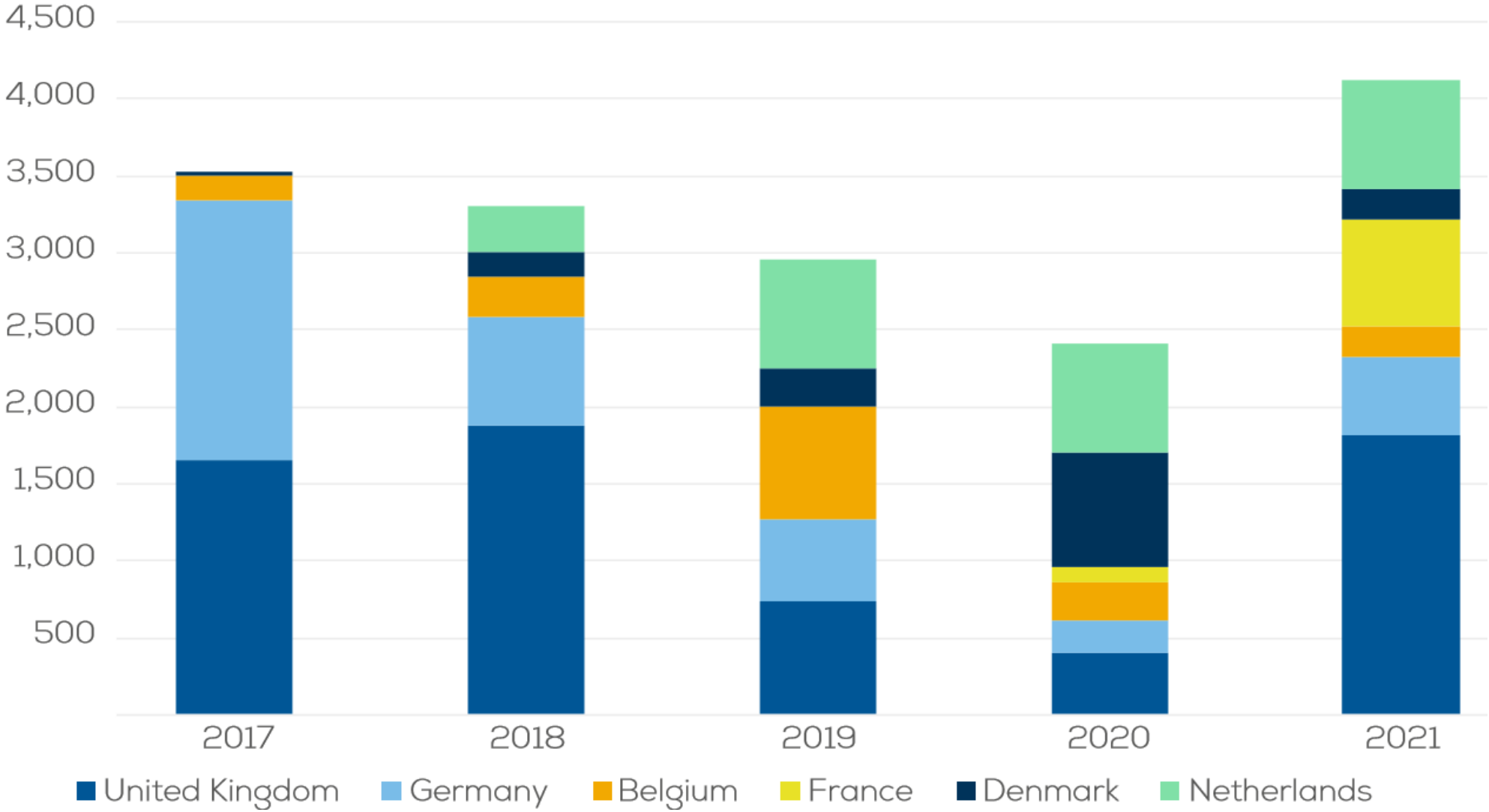
【洋上風力発電】
11事業が最終投資決定（FID）

	M€	MW
ベルギー	:2300	679
デンマーク	:1000	400
フィンランド	: 120	40
ドイツ	: 4289	1235
イギリス	:10493	2594
計	18202	4948

（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

今後の設置量予想（2017～21）

単位：MW



（出所）Wind Europe:The European offshore wind industry key trends & statisutics 2016(2017/1)

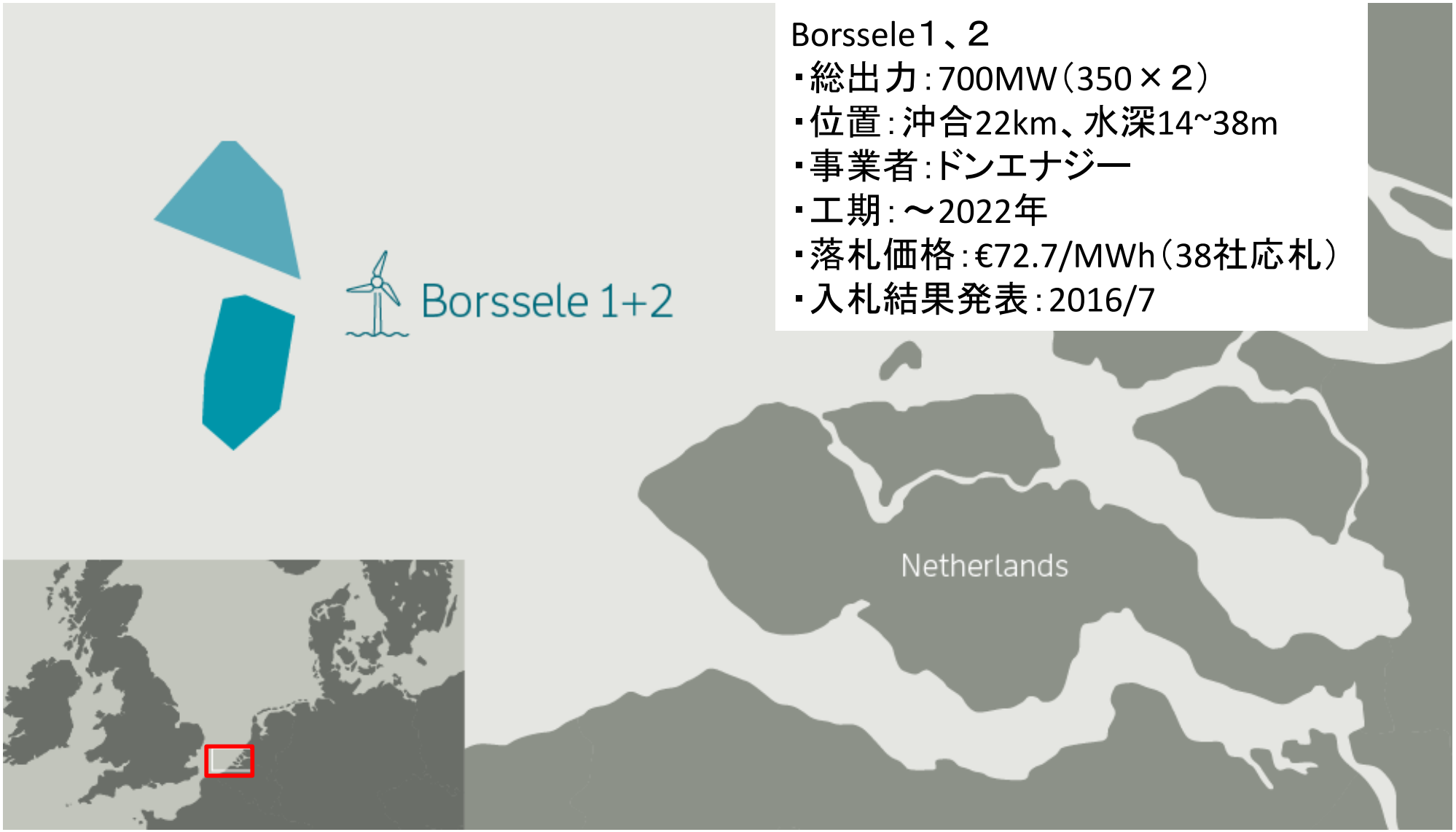
4. 2016年オークション価格の衝撃

2016年にブレークした価格破壊

・アンホルト（丁）：2012年
　*ドンエナジー：€140/MWh、400MW
・ホーンズリーフ3（丁）：15/2
　*バッテンフォール：€103.1/MWh、400MW

・ボルセロ1、2（蘭）：16/7
　*ドンエナジー：€72.7/MWh、700MW
・北海浅海2ヶ所（丁）：16/9
　*バッテンフォール：€60/MWh、300MW
・バルト海Kriegers Flak（丁）：16/11
　*バッテンフォール：€49/MWh、600MW
・ボルセラ3、4（蘭）：16/12
　*シェルグループ：€53/MWh、680MW

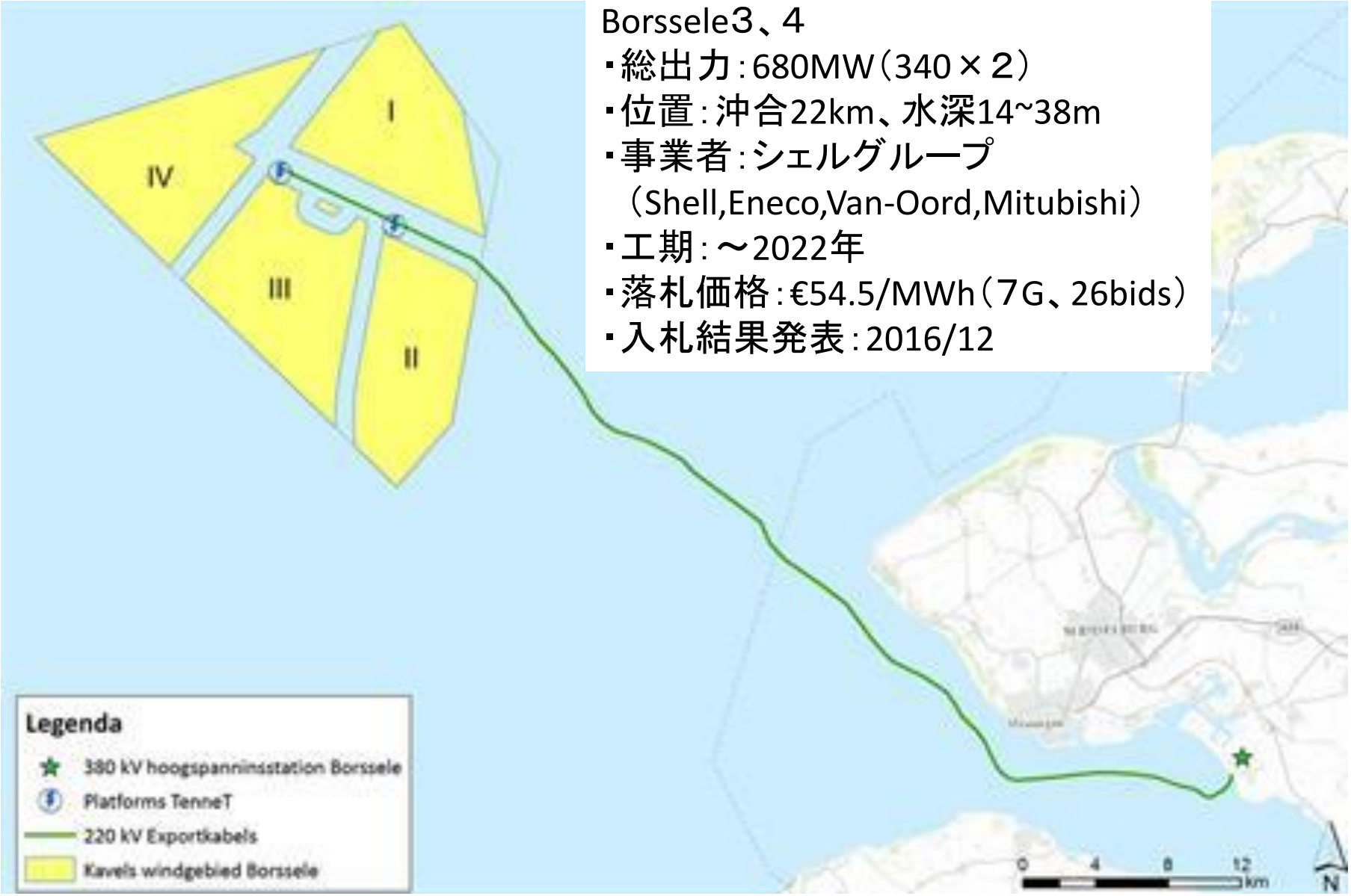
ボルセラ沖事業（1、2期）：位置と概要



Borssele１、２
・総出力：700MW（350×２）
・位置：沖合22km、水深14~38m
・事業者：ドンエナジー
・工期：～2022年
・落札価格：€72.7/MWh（38社応札）
・入札結果発表：2016/7

（出所）Dong Energy

ボルセラ沖事業（3、4期）：位置と概要



Borssele3、4
- 総出力：680MW（340×2）
- 位置：沖合22km、水深14~38m
- 事業者：シェルグループ
  （Shell,Eneco,Van-Oord,Mitubishi）
- 工期：～2022年
- 落札価格：€54.5/MWh（7G、26bids）
- 入札結果発表：2016/12

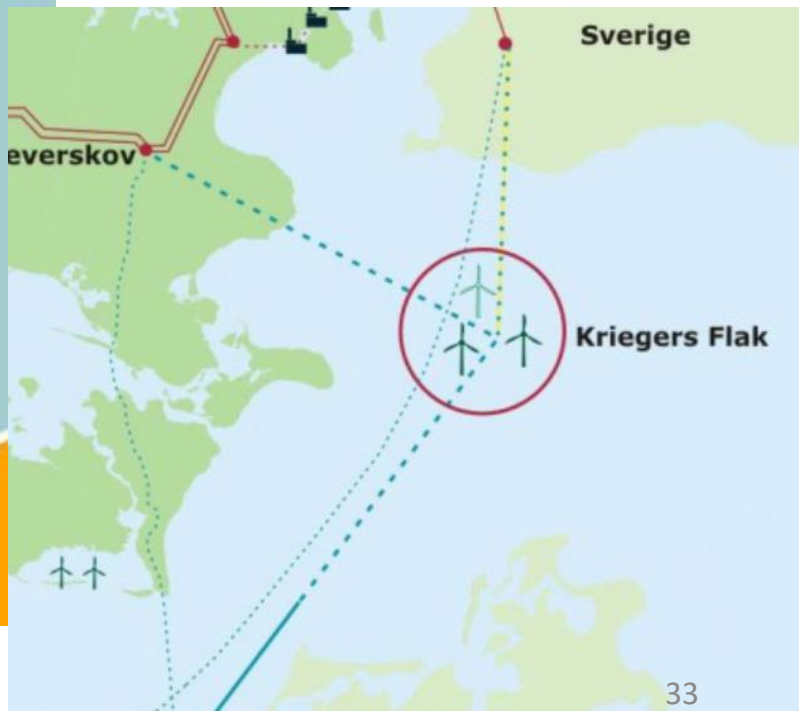
（出所）Wind-Power

デンマーク・北海浅部（ニアショア）事業

Vesterhav-Nord、Syd事業概要
- 総出力：350MW
- 位置：沖合5km
- 事業者：バッテンフォール
- 落札価格：€60/MWh（38社）
- 入札結果発表：2016/9

Kriegers Flak（丁）洋上風力事業

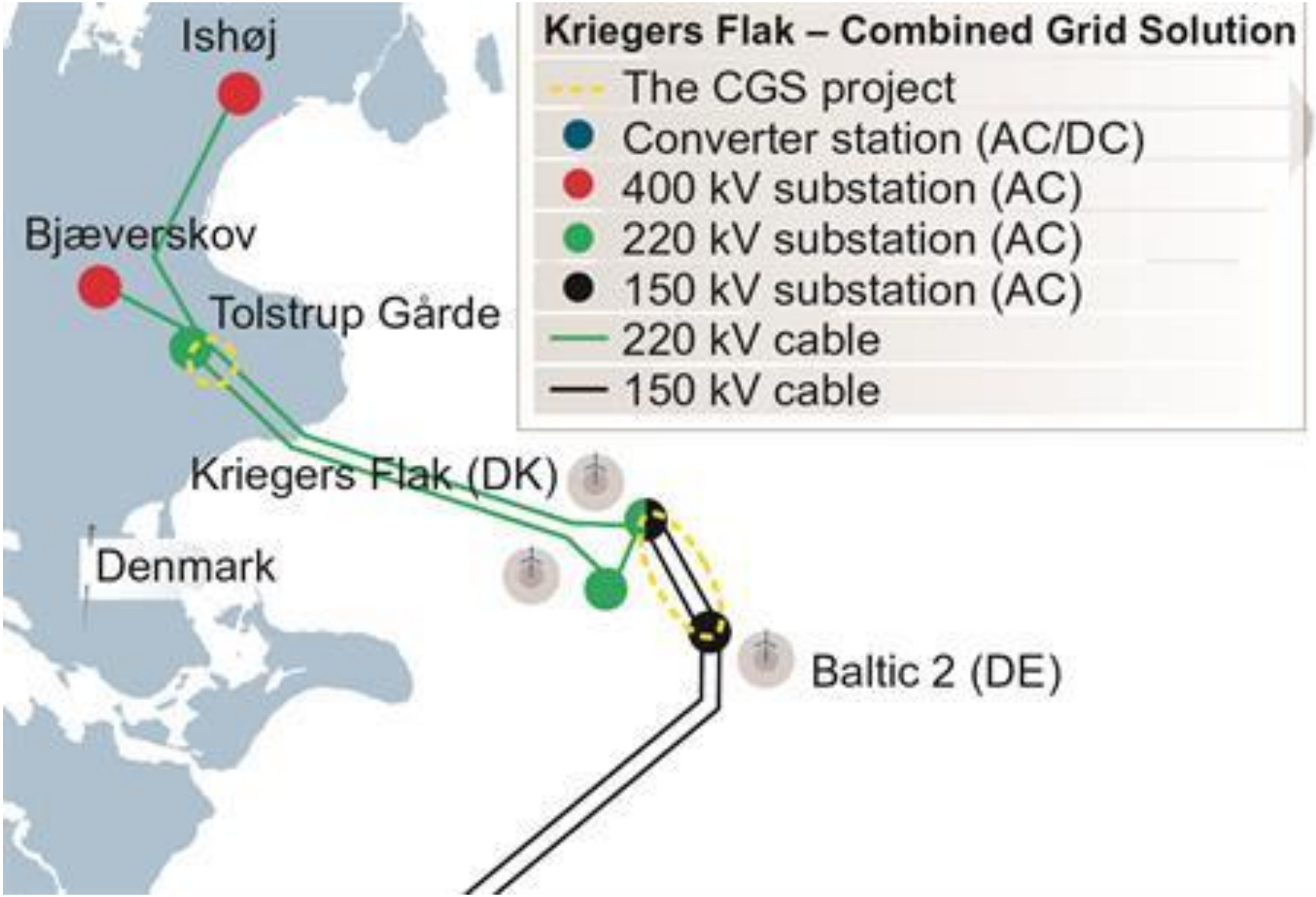
事業概要
- 総出力：600MW
- 位置：沖合15km、水深16～25km
- 事業者：バッテンフォール
- 工期：～2022年
- 落札価格：€49.9/MWh（7G）
- 入札結果発表：2016/11
- 国際連系線建設とセット



（出所）EcoWatch

洋上風力用海底ケーブルを利用した国際連系線

Kriegera-Flak（DK）とBaltic２（DE）



デンマーク・オランダモデルの要諦

・プレディクタブル
　*（大）規模、スケジュール、
　*ﾃﾞﾝﾏｰｸ：2020年再エネ100%目標、洋上3大事業
　*ｵﾗﾝﾀﾞ：700MW×5年（15～19）、1000MW×8年（23～）
・ショベルレディ
　*許認可、環境アセス、インフラ
・競争と支援策
　*オークション
　*営業期間保証：建設～廃止、30年
　*固定販売価格保証：15年（蘭）、5万時間（丁）
・関係者協力、調整
　*ディベロッパー、メーカー、コンストラクト、据え付け
　　インフラ、ファイナンス、行政、
（Cf.）イギリス、ドイツ

洋上風力発電所開発のトレンド

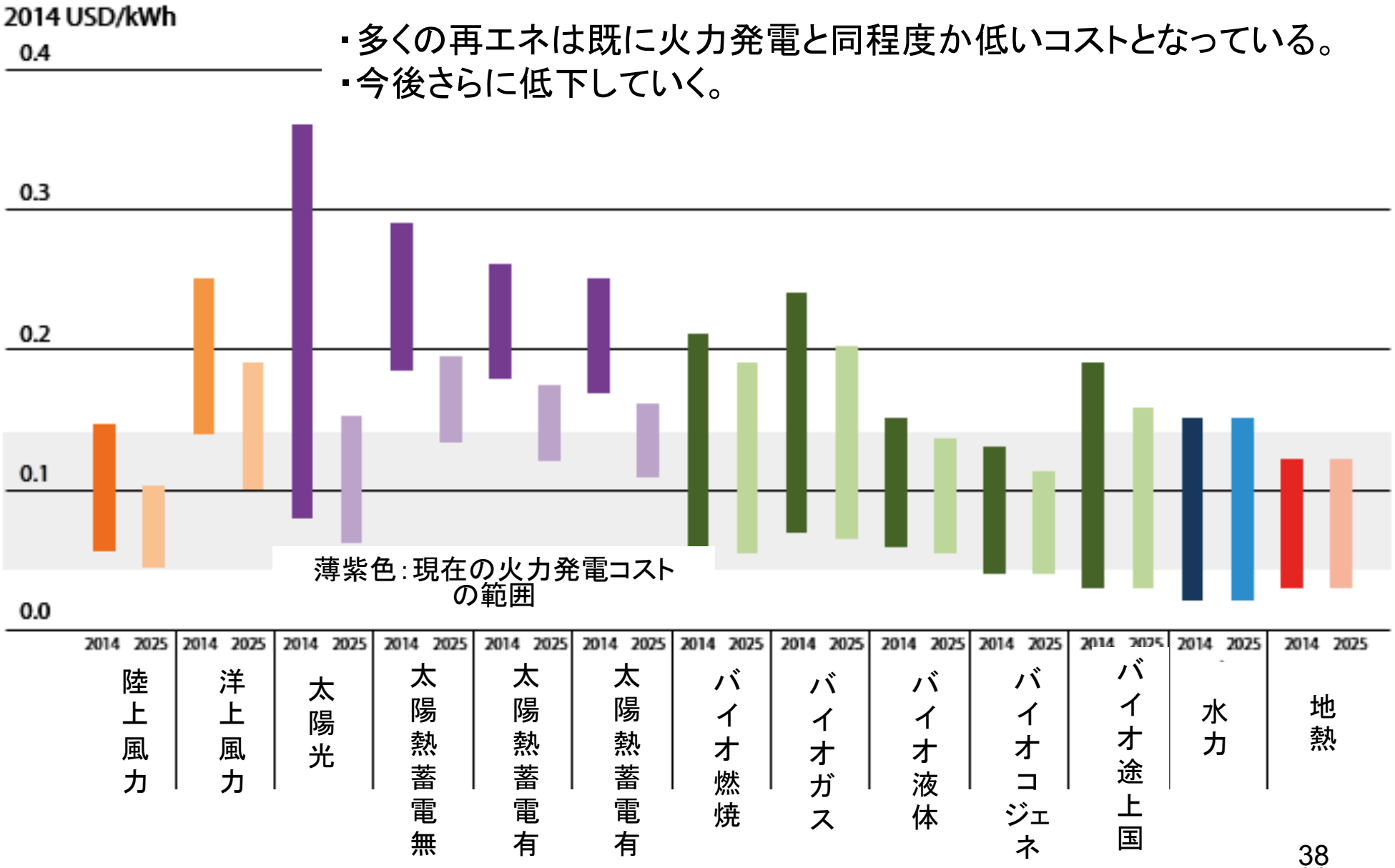
・本気で低コスト化を目指す
・より大きく、大規模に、遠く、速く
・欧州連合、国際連系線建設の視点

・2001年、デンマークで商業化
・2002年、ホーンズリーフ1で大規模発電所商業化。
・イギリス、洋上風力に焦点、リードする。
・ドイツ、エネルギーベンデの仕上げとして注力。
・デンマーク・オランダモデルの台頭
・欧州大で事業量を確保し、技術力維持。

５．洋上風力コスト削減と産業化

再エネ発電コスト比較（2014年、2025年）

・多くの再エネは既に火力発電と同程度か低いコストとなっている。
・今後さらに低下していく。



（資料）IRENA（国際再エネ機関）：Renewable Energy Generation Cost in 2014 (2015/1) より作成

38

太陽、風力発電コスト比較（2014年、25年）

	Global weighted average data								
	Investment costs (2015 USD/kW)		Percent change	Capacity factor		Percent change[2]	LCOE (2015 USD/kWh)		Percent change
	2015	2025		2015	2025		2015	2025	
Solar PV	1 810	790	-57%	18%	19%	8%	0.13	0.06	-59%
CSP (PTC: parabolic trough collector)	5 550	3 700	-33%	41%	45%	8.4%	0.15 -0.19	0.09 -0.12	-37%
CSP (ST: solar tower)	5 700	3 600	-37%	46%	49%	7.6%	0.15 -0.19	0.08 -0.11	-43%
Onshore wind	1 560	1 370	-12%	27%	30%	11%	0.07	0.05	-26%
Offshore wind	4 650	3 950	-15%	43%	45%	4%	0.18	0.12	-35%

（出所）IRENA（国際再エネ機関）：

“THE POWER TO CHANGE: SOLAR AND WIND COST REDUCTION POTENTIAL TO 2025”（2016/6）

洋上コスト低下を目指して

- 大規模化、大型化
- 故障しない
- 時間短縮
- 関係者のコラボ
- 制度整備
- 予測可能
- 事業規模確保
- 産業を作る

11 エネルギー事業者の共同宣言

【欧州9か国の協力】独、丁、蘭、仏、ﾍﾞﾙｷﾞｰ、ﾙｸｾﾝﾌﾞﾙｸﾞ、ﾉﾙｳｪｰ、ｽｳｪｰﾃﾞﾝ、ｱｲﾙﾗﾝﾄﾞ
・エネルギー担当大臣が、洋上風力に協力して取組む趣旨も覚書（MOU）にサイン（6/6/2016）

Adwin、EDP、Eneco、E.ON、GE、Iberdrola、MHI-Vestas、RWE、Siemens、Statoil、Vattenfall、DONG-Energy

（出所）The joint statement of 11 energy companies (6/6/2016)

まとめ

- 低・脱炭素化を目指して再エネは急速に普及
- 牽引する風力、太陽光はコストが急減
- パリ協定発効等を背景に、再エネ普及は拍車がかかる
- 大規模再エネ発電所として、洋上風力はこれからの主役になっていく。
- 再エネで先行する欧州は、洋上風力の商業化が進み、欧州大での関係者の協力体制も整ってきている。
- 大規模・大型化・故障フリー等の技術開発、デンマーク・オランダモデルの確立等で産業化は軌道にのる。
- 中国、米国、アジア等で追随
- 日本も動きが出てきており、市場としても注目されている。関係者が本気にならないと海外勢に席巻される懸念も。

ご清聴、有難うございました。