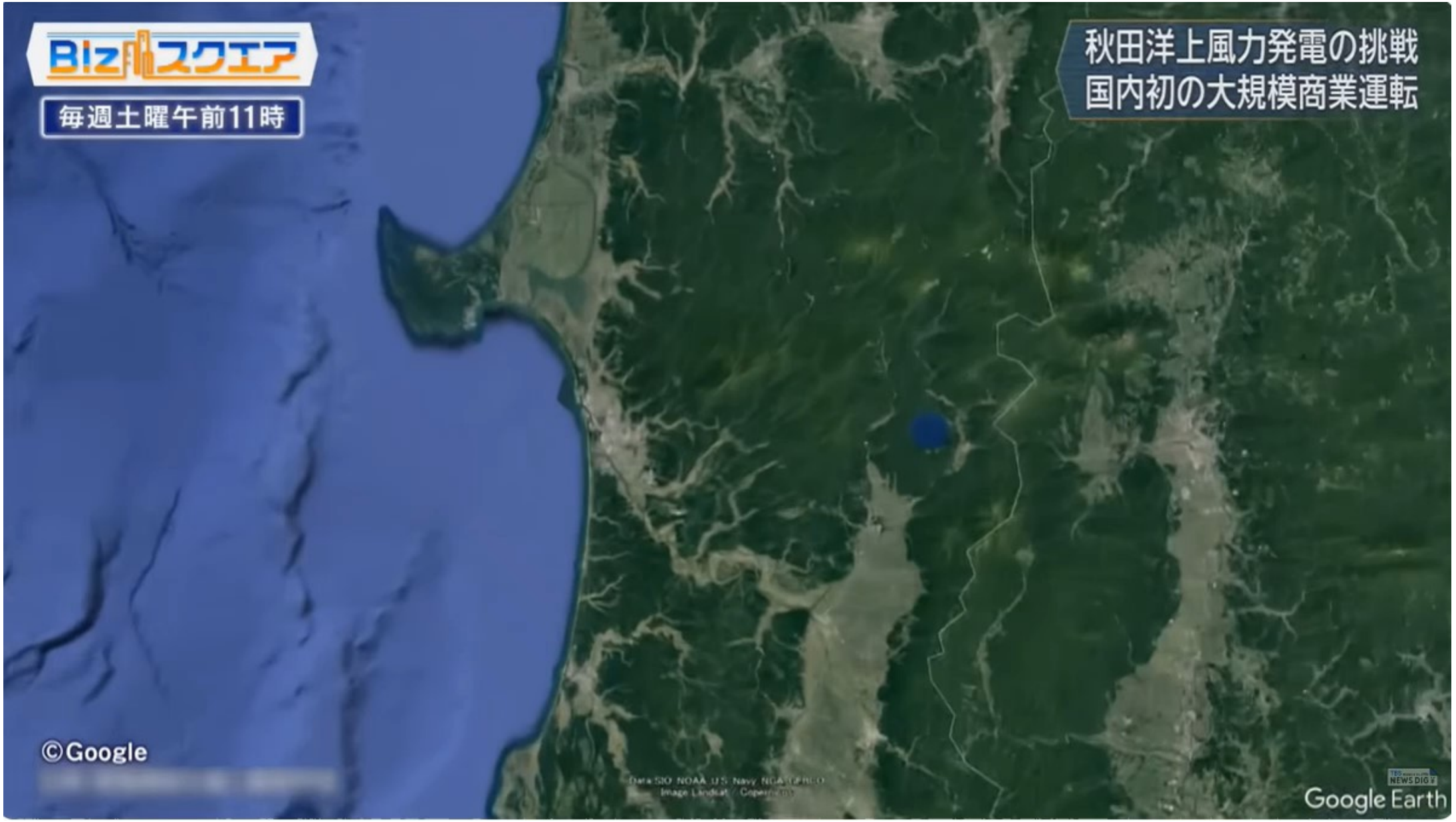
２０２４年２月１５日（木）
易しい科学の話

洋上風力発電ってなぜ有望なの？

問題はないの？

吉岡　芳夫


Bizスクエア
毎週土曜午前11時
秋田洋上風力発電の挑戦
国内初の大規模商業運転
©Google
Google Earth

国内最大規模の洋上風力発電所　１月１日商業運転開始
一般家庭約８万３０００世帯分の電力（youtube.com）

国内最大規模の洋上風力発電所　１月１日商業運転開始　一般家庭約８万３０００世帯分の電力

https://www.jepoc.or.jp/upload/lecture/221213103453.pdf

洋上風力発電の動向と課題

（一財）電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部

田村　英寿

第65回　電力土木講習会

電力中央研究所

洋上風力発電は、なぜ有望なのか？

- 洋上では陸地よりも風が安定しており、強風域も多いので、大きな風力（エネルギー）を使える。
- 海上では風車の大型化が可能なので、発電出力を大きくできる。
- 陸地では、風が地形や建造物に影響されるが、洋上の風はそれらの影響を受けない。
- 洋上風力発電は土地を必要としないので、土地使用の制約や環境への影響を最小限に抑えられる。

日本での洋上風力発電の問題は？

- 欧州や北米に比べ、強風のある地域が電力の消費地から遠い。
- したがって、長距離の大電力送電が必要になるが、今の送電線では、とても大電力は送れない。
- トラブルがあった場合の点検や、修理が陸上よりやりにくい。
- 欧州のように海が遠浅ではないので、着床式のタワーを立てられないことが多い。したがって、浮体式にならざるを得ない。
- 多数の洋上風力発電装置から陸地迄海中の送電が必要。
- 漁業に影響を与える。

洋上風力発電とは？陸上風力発電との違いやメリット・デメリットを解説！ - Green＆Circular 脱炭素ソリューション｜三井物産 (mitsui.com)

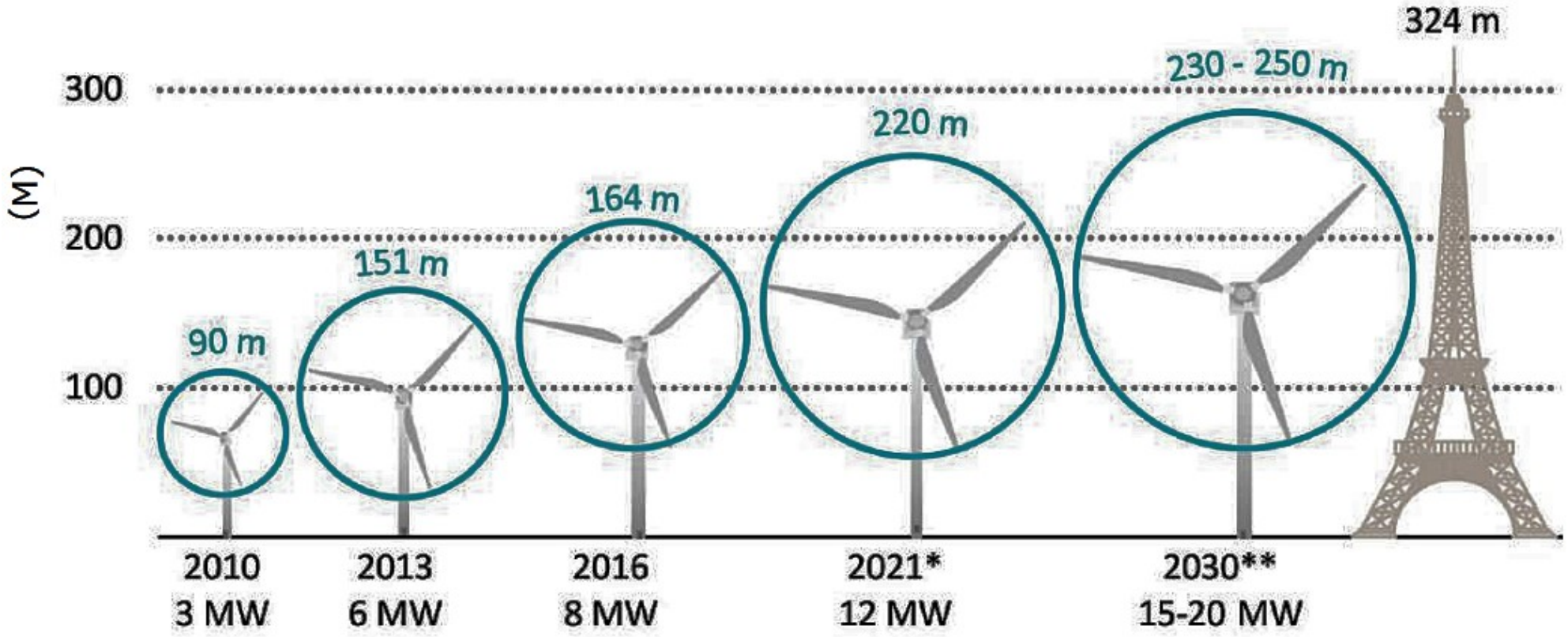
洋上風力発電とは？陸上風力発電との違いやメリット・デメリットを解説！

巨大な風力発電機は製造できるのか？

- 大出力にするには、風車発電機を高い塔の上に載せ、回転直径を大きな風車を作らなければならない。
- 開発された最大の洋上風力発電装置は、
  - 風車の直径が、２３０ｍ
  - 塔の高さが、　１６０ｍほど
  - 最大出力は、　１５ＭＷ（１万５千ｋＷ）

商用の最大風力発電装置の進歩

Figure 14.4 ▷ Evolution of the largest commercially available wind turbines



Technology advances enabled offshore wind turbines to become much bigger in just a few years and are supporting ongoing increases in scale

風力タービンの仕組みとは？（youtube.com）

風力タービンの仕組みとは？

高所、強風もへっちゃら！風力発電を支える、プロフェッショナルたち。（youtube.com）

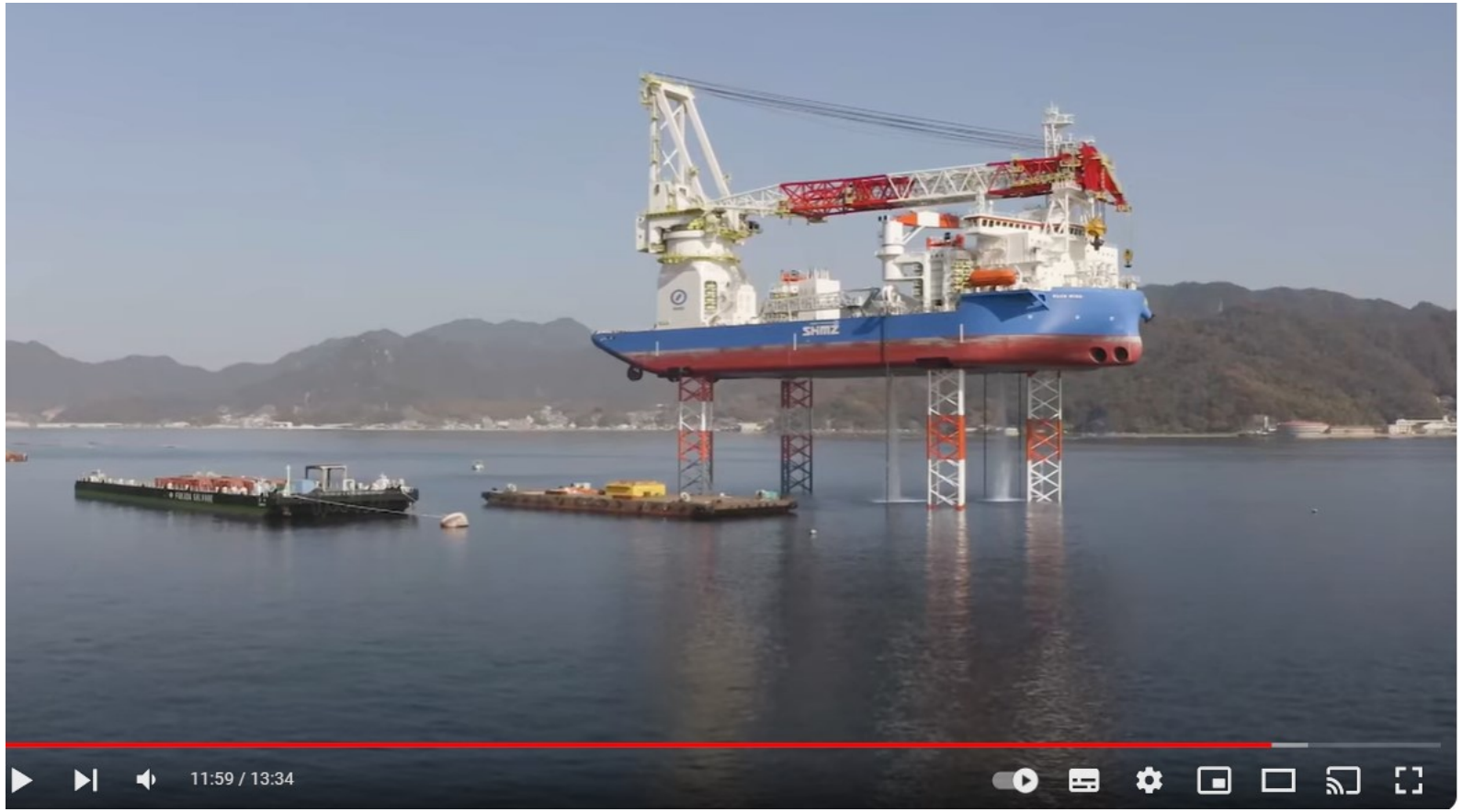
【事業紹介動画】リエネ六ヶ所村千歳風力発電所（2022年3月2日運転を開始）（youtube.com）

海上での風力発電装置の建設はむつかしいのでは？

- 着床式、浮体式とも建設工事は十分可能になっている。
- 工事には巨大な、そして専用の特殊な船が使われる。
- 風車の方式により、違った船が使われる。

“海に浮かぶ発電所”エネルギー危機救うか 全長130m「浮体式洋上風力」立つ瞬間(2023年2月5日)【山口豊アナが見たSDGs最前線】(youtube.com)

SEP船で新たな洋上風力発電を拓く－清水建設／チャンネルジャパン2022＃44（日本語版）（youtube.com）



洋上風力発電の発電コストは？

- 秋田県の洋上風力は、１ｋWH あたり３６円で売電、約２０年で回収する。
- 原子力や石炭火力は、１ｋWh あたり ９円から１０円。

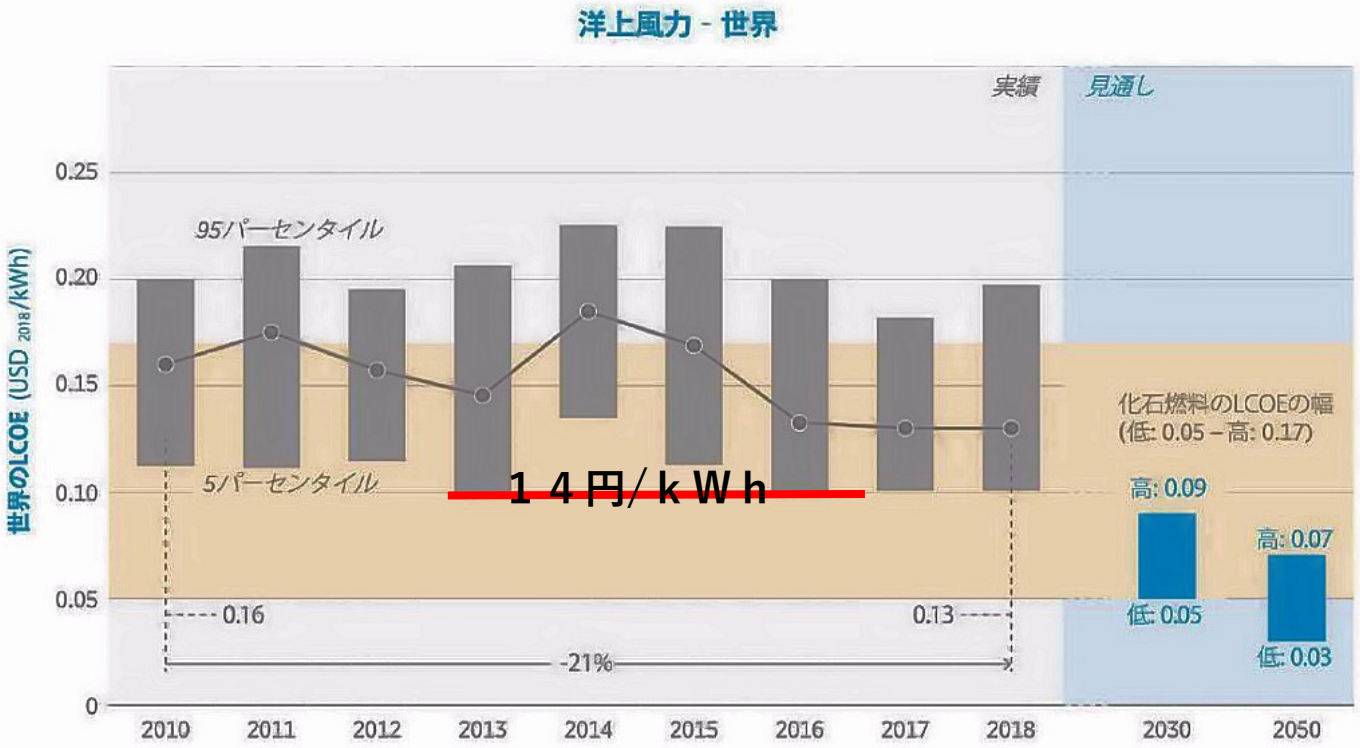
- 洋上風力は、陸上の風力よりコスト高。

FIT制度における2021年度の買取価格・賦課金単価等を決定しました （METI/経済産業省）

従来の発電装置の発電単価には、届かない。

図11 洋上風力発電の2030年まで及び2050年へ向けたLCOE(IRENA)

Figure 24: By 2050, the LCOE wind would be competitive, reaching lower fossil fuel ranges.



Source: Historical data based on IRENA (2019c), and future projections based on IRENA's forthcoming report Solar and wind cost reduction potential to 2030 in the G20 countries (IRENA, n.d.)

出典）IRENA "Future of Wind" Figure 24（2019年10月）

IRENAの報告書（前出）から、2010～2050年までの均等化発電原価（Levelized Cost Of Electricity：LCOE)を図11に示す。

2018年のLCOEの国際的な加重平均は0.127 USD/kWhであり、2010年に比べ20%以上低下した。

2030年までにはさらなる低下が見込まれ、0.05 USD/kWh～0.09 USD/kWhのレンジとなり、2050年までには0.03 USD/kWh～0.07 USD/kWhのレンジになる。

他方、化石燃料による発電のLCOEは0.05 USD/kWh～0.17 USD/kWhであるため、洋上風力発電は補助金等に依存することなく、化石燃料発電に対する競争力を持ち得ると言える。

風力発電の発電電力と発電電力量の関係

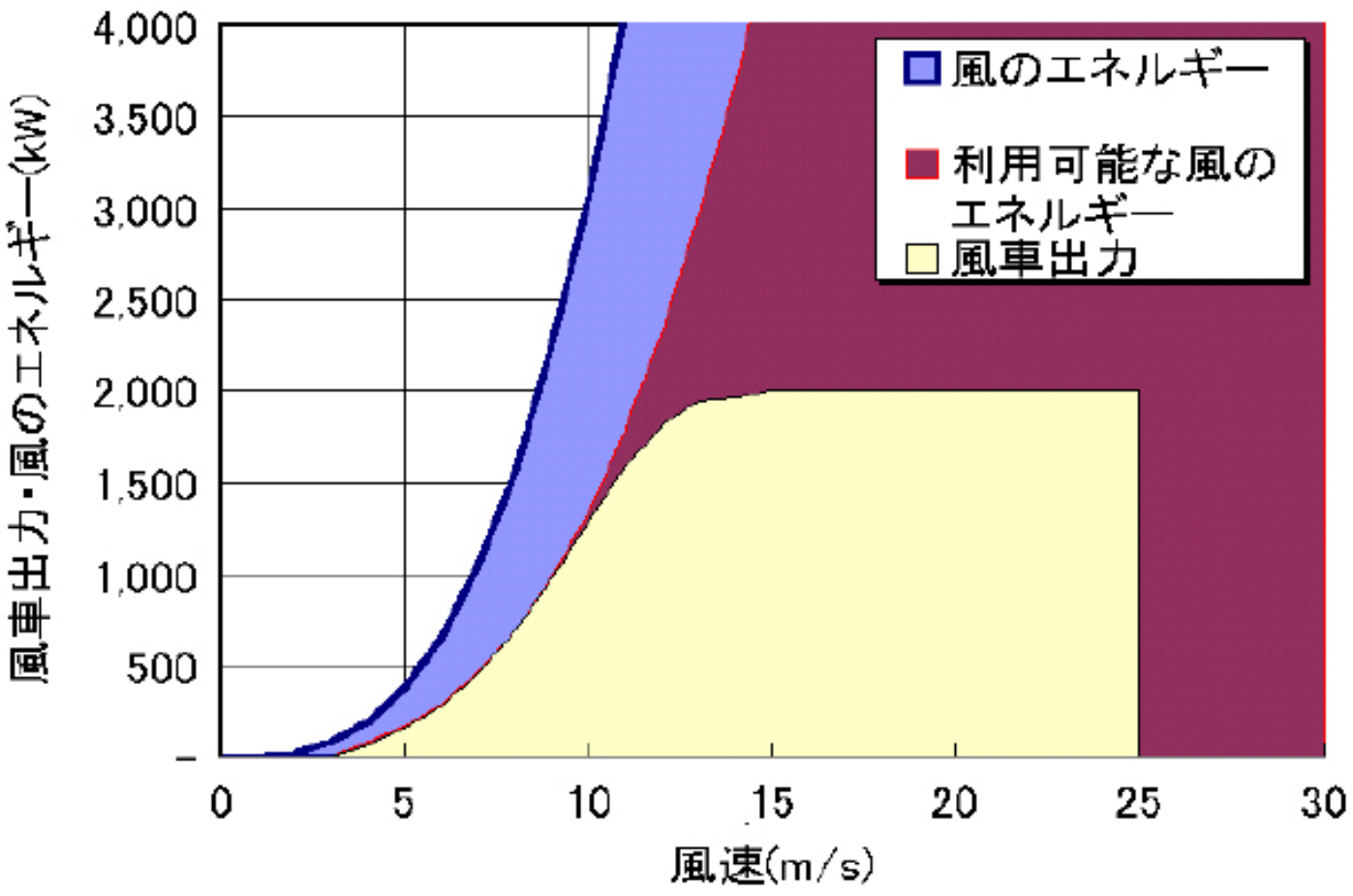
- 例えば、１００万ｋＷの洋上発電システムができたとして、それは、原子力発電の１００万ｋＷと同じか？

- 原子力は、２４時間連続で発電できるので、
一日では２４００万ｋWHの発電量である。

- 洋上風力発電では、**利用率**が高くても３０％なので、
一日では、７２０万ｋWHである。

利用率：　全出力に対して、実際に発電できる量の割合を言う。
風が設計基準より弱いと、少ししか発電できない。
一日中、強い風が吹くとは限らない。

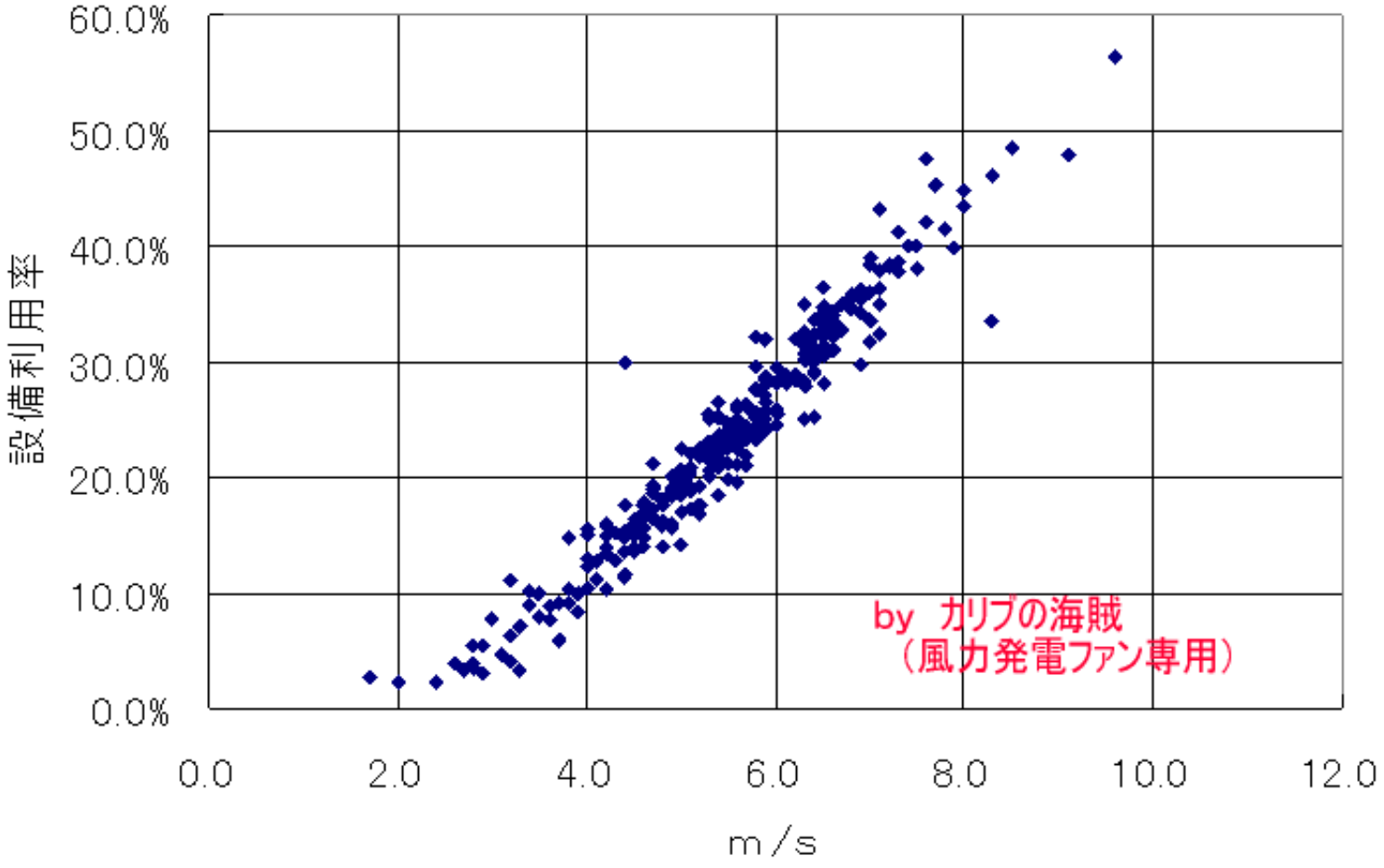
風のエネルギーと風車が利用できる範囲の例



風速12m/sで最大出力を設計するのが普通

風速と設備利用率（試算）

風車が回っていても、風が弱いと発電量は少ない。



出展：http://homepage3.nifty.com/carib7/eng/wind/index.htm

風の強さ

ﾚﾍﾞﾙ2：軽風　風速は毎秒1.6～3.3メートルで、顔に風を感じるようになり、木の葉がそよぐ。風見も動き始め、海上は一面にさざ波が現われる。

ﾚﾍﾞﾙ3：軟風　風速は毎秒3.4～5.4メートルで、木の葉や細い小枝が絶えず動く。海上は波頭が砕け始め、泡は硝子のように見える。白波が現われる。

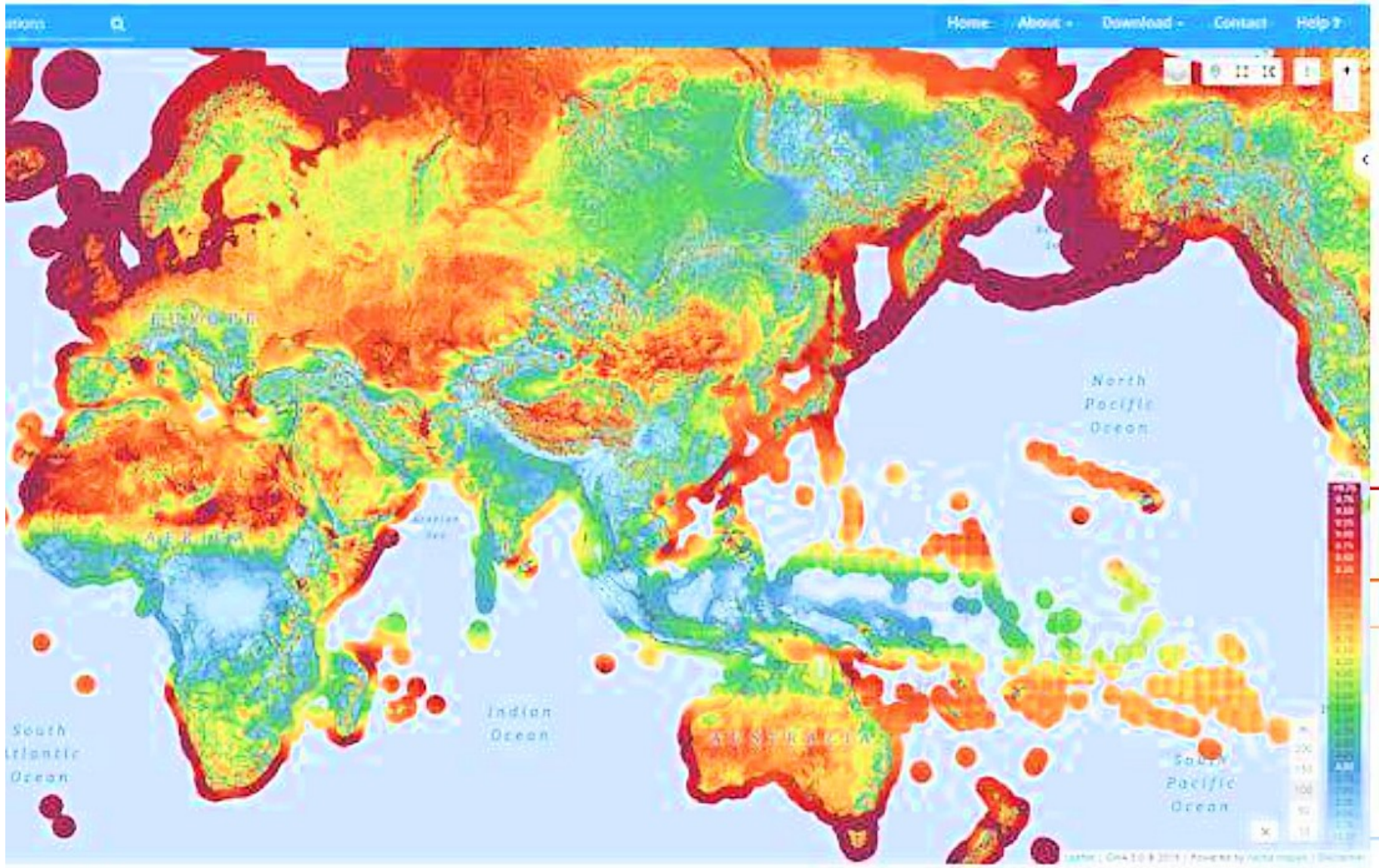
ﾚﾍﾞﾙ4：和風　風速は毎秒5.5～7.9メートルで、小枝が動く。道路からは砂塵が立ち、紙片が舞い、海上には白波がかなり多く見える。

ﾚﾍﾞﾙ5：疾風　風速は毎秒8.0～10.7メートルで、葉の茂った樹木が揺れ動き、池や沼の水面にも波頭が立つ。海上は白波がたくさん現われ、しぶきが立ち始める。

ﾚﾍﾞﾙ6：勇風　風速は毎秒10.8～13.8メートルで、大枝が動き電線が唸り始める。雨が降っていても、傘をさすのは困難。海上は波の大きいものが出来始め、波頭は砕けて白く泡立つ。

ﾚﾍﾞﾙ7：強風　風速は毎秒13.9～17.1メートルで、樹木全体が揺れ、風に向かって歩きにくくなる。海上は大波が立ち、波頭は砕けて海面は白い泡に覆われる。

図16 世界の風況マップ(World Bank)



世界の風況マップを図16に示す 。欧州や米国は年間の平均風速が概ね9m/s以上であるのに対し、アジアは7m/s ～8m/sとなっている。

（凡例補足）

9.75m/s 超

8.0m/s

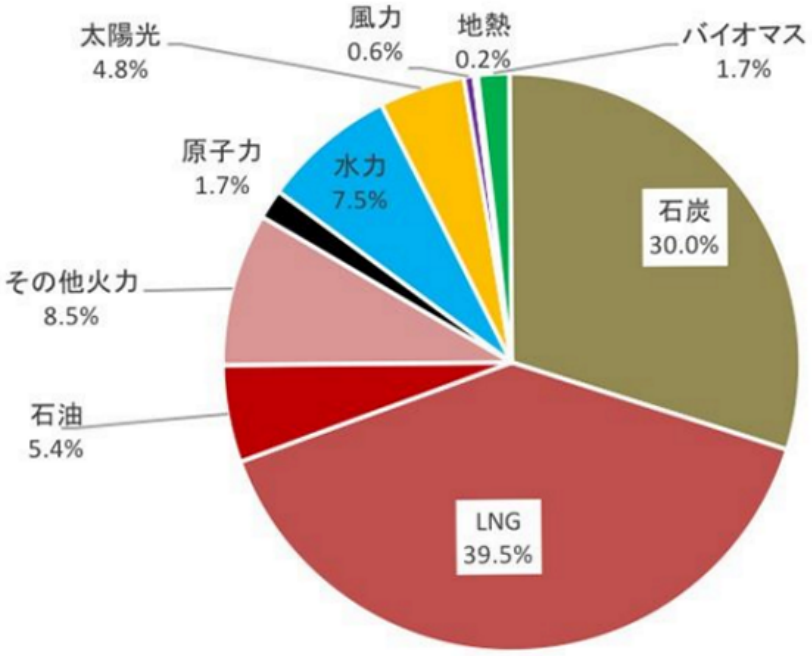
7.0m/s

2.5m/s 未満

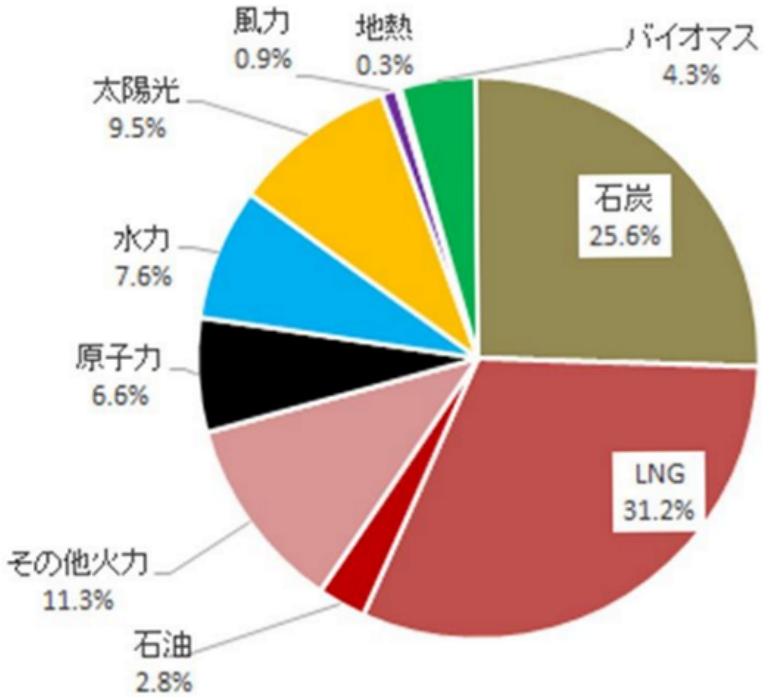
い て、事業者選定後の案件は選定事業者の

日本国内の電源構成

最近5年間で太陽光発電の普及が進んでいるが、風力は大きく伸びていない。



2016年度



2021年度

日本国内の電源構成（年間発電量）

【図の出展】＜2016年度の図＞環境エネルギー政策研究所：自然エネルギー白書2017
＜2021年度の図＞環境エネルギー政策研究所：国内の2021年度の自然エネルギー電力の割合と導入状況（速報）

欧州と日本の電源構成

日本の再エネ発電の比率は欧州全体の半分程度。風力比率は15分の1以下。

電源の種類		欧州全体（2021年） 年間発電量 [TWh]		欧州全体（2021年） 構成比率 [%]		日本（2021年） 年間発電量 [TWh]		日本（2021年） 構成比率 [%]	
石油		47.9		1.2		31.3		3.1	
天然ガス		799.3		19.8		326.1		32.0	
石炭		632.0		15.7		301.9		29.6	
原子力		882.8		21.9		61.2		6.0	
再エネ（水力）		649.7		16.1		77.6		7.6	
再エネ（水力以外）	風力	946.5	503.0	23.5	12.5	130.3	8.2	12.8	0.8
	太陽光		195.6		4.9		86.3		8.5
	その他		247.9		6.1		35.8		3.5
その他		74.2		1.8		91.3		9.0	
合計		4032.5		100		1019.7		100	

【数値の出展】bp：Statistical Review of World Energy 2022 71st edition, 2022

世界の浮体式洋上風力プロジェクト

導入されている浮体式洋上風力発電プロジェクトの概要（2019年1月時点）

	Hywind	WindFloat ※事業終了	環境省浮体式洋上風力発電実証事業	福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業	Hywind pilot park	FloatGen	次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）
事業規模	2.3MW	2.0MW	2.0MW	14.0MW	30MW	2.0MW	3.0MW
実施海域	ノルウェー	ポルトガル	日本	日本	英国	フランス	日本
稼動開始年	2009 年	2011 年	2013 年	2013 年 2015 年 2016 年	2017 年	2018 年	2018 年 (設置年)
設置基数	1 基	1 基	1 基	3 基	5 基	1 基	1 基
浮体形状	Spar	Semi-Sub	Spar	Semi-Sub Semi-Sub Spar	Spar	Pontoon	Pontoon
水深	220m	40-50m	100m	120m	95-120m	33m	50m
離岸距離	10km	5km	1km	20km	25km	20km	15km
風力発電設備メーカー	Siemens 2.3MW	Vestas 2.0MW	日立製作所 2.0MW	日立製作所 2.0MW 三菱重工業 7.0MW 日立製作所 5.0MW	Siemens 6MW	Vestas 2.0MW	Aerodyn 3.0MW
係留索数	3 本	4 本	3 本	6 本 8 本 6 本	3 本	6 本	9 本

- 浮体式に関しては、日本でも多くの実証試験が行われており、一部は商用運転もされている。浮体の形状も多様である（スパー・セミサブ・アドバンストスパー・バージ）。
- さらに長崎県五島市沖では16.8MW（8基）の事業の設置工事が2024年1月の運転開始に向けて進められている。

【表の出展】浮体式洋上風力発電導入マニュアル、福島洋上風力コンソーシアム、2019年3月（※ 一部加筆）

★原発事故から復興の象徴　洋上風力発電の撤去検討(18/10/27) - YouTube

洋上風力で発電した電気を需要地に送る方法は？

- 電気を送るためには、
  - 洋上の風力発電装置から、陸上まで電気を送る
  - 陸上まで届いた電気を、電気の需要地まで送る

- 電気を送る方法は、物資の輸送法と似ている
  - 物資を送るのが高速道路
  - 電気を送るのが送電線路

- 地方で大量生産すれば、その輸送に大きな高速道路が必要になる
- 地方で大量の電気を作れば、送電線路も巨大にしなければならない。
- 高速道路を作るのは大変だが、送電線路を作るのも大変。

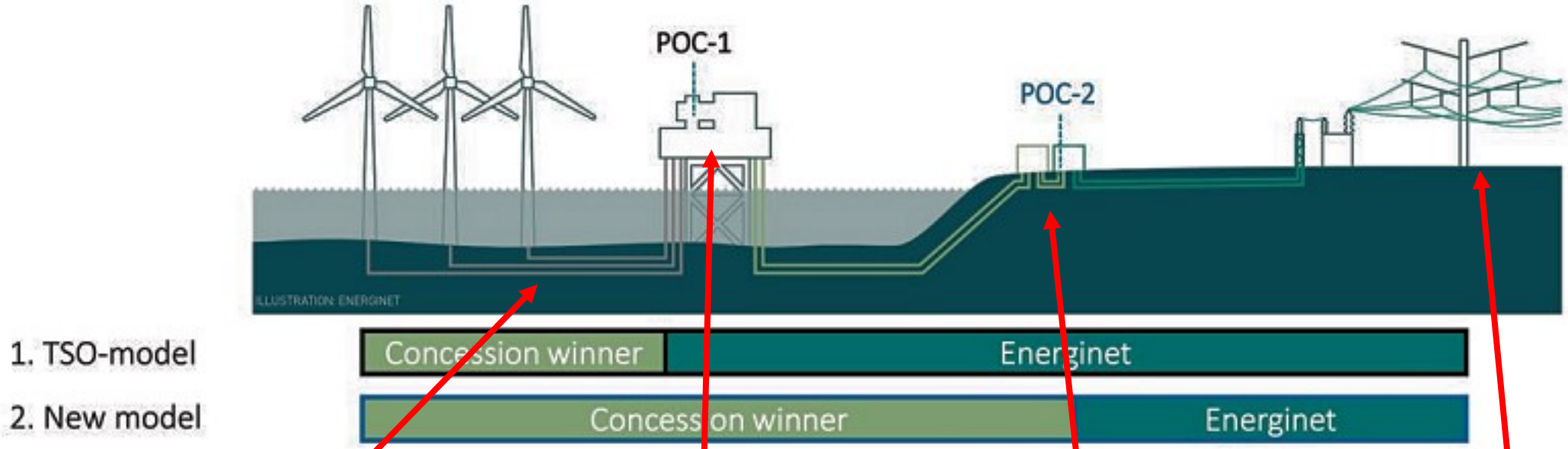
電気を送る方法

- 交流と直流で送る方法がある。
- 通常は、交流で送電である。
  - 実は、遠くへ大量の電気を送るのはやさしくない。超高電圧が必要になる。送電線の鉄塔が、高さ１００ｍにもなる。通る場所の確保（用地買収ばど）がむつかしい。
- 直流は、長距離の送電に有利。
  - 直流送電は、電力ケーブルを海底に通す。用地買収の課題が楽になる。

政府の大方針で最大の問題は、送電にある。
風力発電で大量の電気を作るのは、発電事業者。事業費は電気代金で賄える。
電気を送る事業者は、長距離の送電用に過大な建設費がかかるが、送電料（物資の輸送での高速道路料金にあたる）は、回収が容易ではない。送電料を高くすれば、電気料は、発電量に上乗せされ、電気料が高くなる。

洋上風力が日本のエネルギーを支える（renewable-ei.org）

図１-8　デンマークの海域送電施設の責任負担モデル



出典）Energinet.dk, “Thor Offshore Wind Farm Market dialog Grid connection” (Nov. 2019), p.4.
https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/6_thor_grid_connection.pdf

海底で交流の送電

洋上に作る変電所

陸上に作る変電所

交流送電線

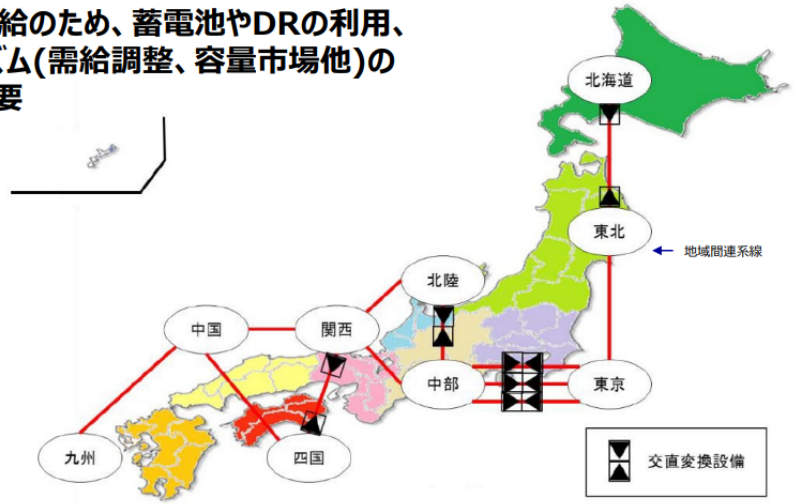
001_04_01.pdf (meti.go.jp)

洋上風力の主力電源化を目指して

再エネ主力電源化に適した電力ネットワークの形成と運用

20

- 送電線利用ルールを早期に見直し
- 欧米と同様の実潮流ベースによる系統連系を早期に実現
- 洋上風力由来電力を需要地に送電可能とするマスタープラン
- 電力安定供給のため、蓄電池やDRの利用、市場メカニズム(需給調整、容量市場他)の活用等も必要

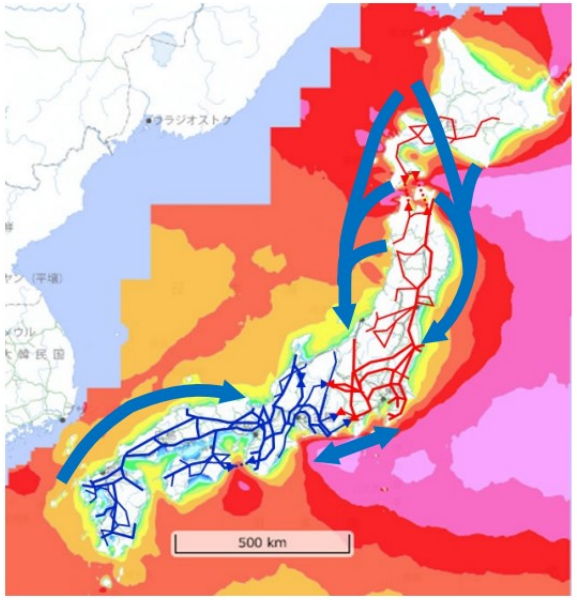


一般社団法人 日本風力発電協会

出典: 電力広域的運営推進機関　年次報告書　2019年度版

【参考】ジャパン・スーパーグリッドのイメージ

21



※ NEDO洋上風況マップ（http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html）に主要電力系統（275kV以上）概略図を重ねた

大型電源＝広域消費

ダム

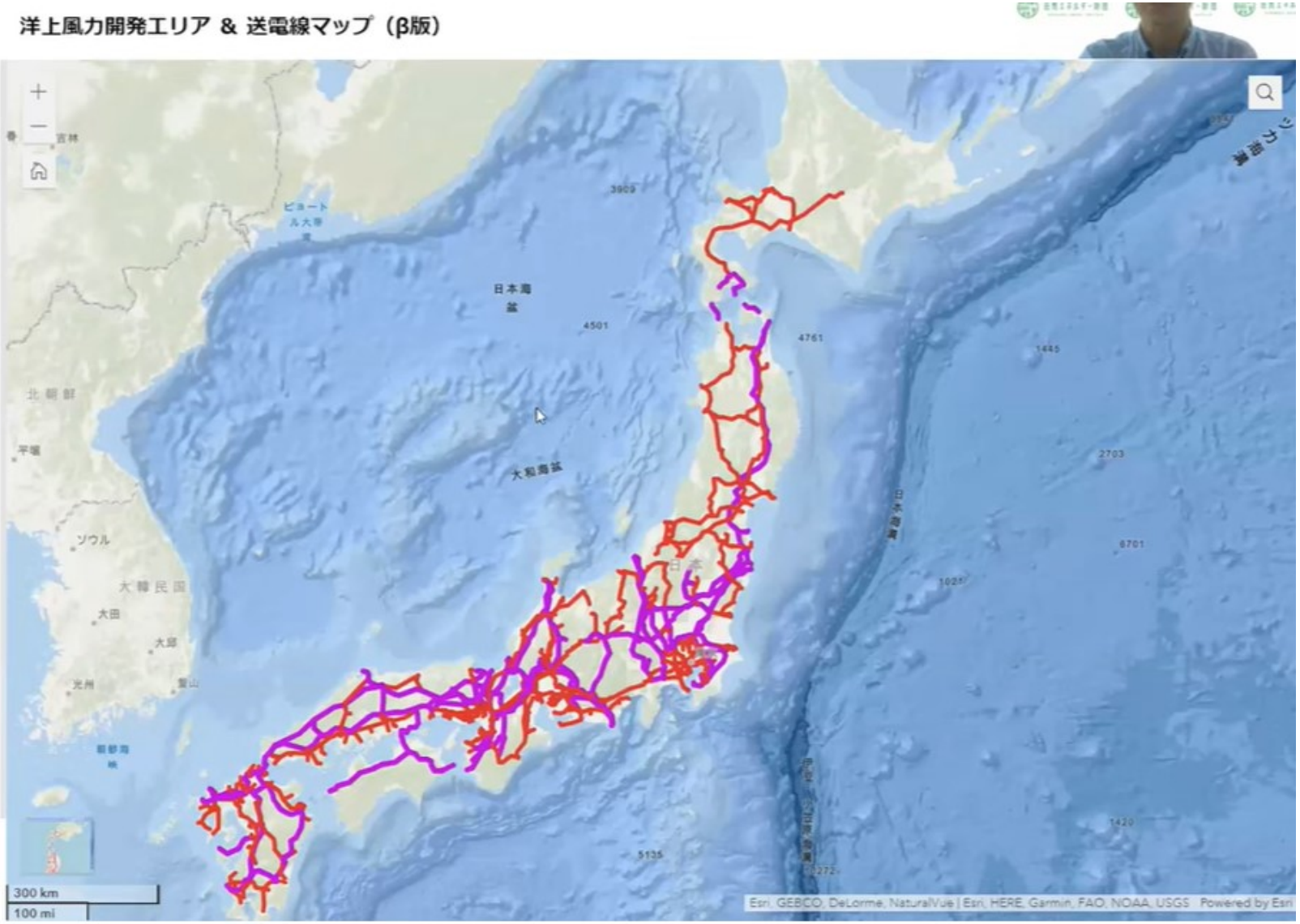
原子力

洋上風力

- 海底ケーブルによる短納期での整備
- 直流送電でロス少なく長距離に最適
- 全国大で系統の一体運用を可能に

一般社団法人 日本風力発電協会

20230607_洋上風力開発エリア＆送電線マップ（β版）の使い方 (youtube.com)



https://www.youtube.com/watch?v=fbs15lMMReE

まとめ

北海道から首都圏に送電する海底送電線が建設されます。

2030年代の完成を目指しています。

北海道の再エネ電力を首都圏に送電する試みは成功するのか？

日本の送電線容量が不足【現状】と【解決策】について。(youtube.com)

まとめ

送電網の容量不足が問題となっています。

既設送電線を有効活用するためのルール変更が進んでいます。

再エネの増加に対応するため、送電線の新設を計画しています。

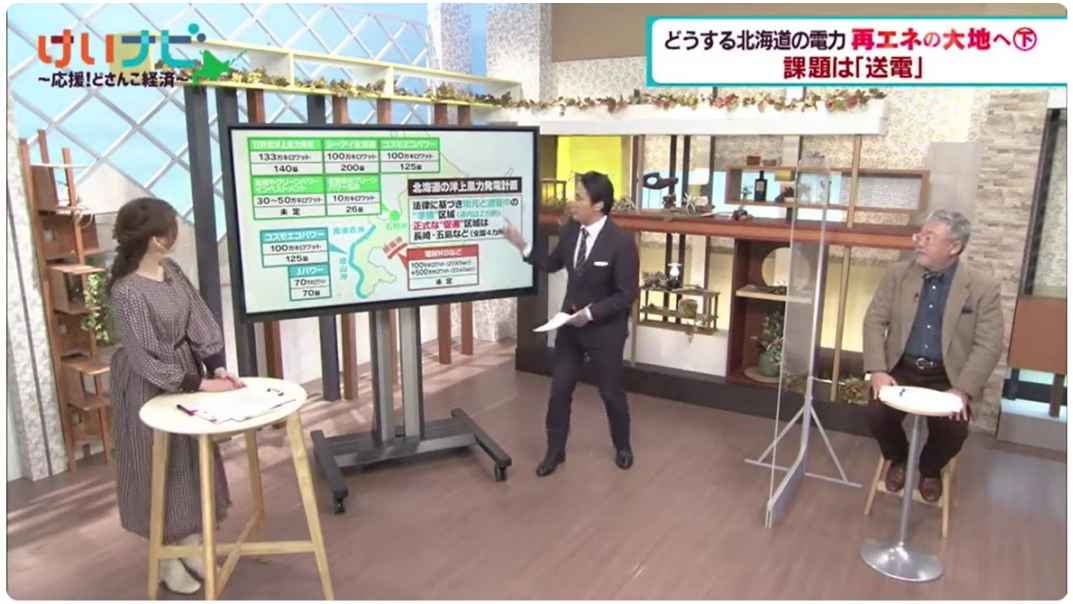
日本初！風力発電専用の送電線が今春から稼働　北海道の強みどう生かす？　風車で変わる未来【サステナ！宣言】（youtube.com）

日本初！風力発電専用の送電線が今春から稼働　北海道の強みどう生かす？　風車で変わる未来【サステナ！宣言】

１１月１４日放送　再エネの大地へ どうする北海道の電力㊦
課題の送電－③ (youtube.com)

送電線で法外な負担金・・・再生エネ事業者が透明化要望(17/12/23) (youtube.com)

１１月１４日放送　再エネの大地へ どうする北海道の電力㊦　課題の送電－②(youtube.com)



１１月１４日放送　再エネの大地へ どうする北海道の電力㊦　課題の送電－②

１１月１４日放送　再エネの大地へ どうする北海道の電力㊦　課題の送電－③(youtube.com)

【衝撃】故障か？？ 巨大な風力発電機が倒壊、炎上する瞬間！【事故】（youtube.com）

風力発電機崩壊（youtube.com）

【衝撃】故障か？？ 巨大な風力発電機が倒壊、炎上する瞬間！【事故】（youtube.com）

２０２４年２月１５日（木）
易しい科学の話

洋上風力発電ってなぜ有望なの？

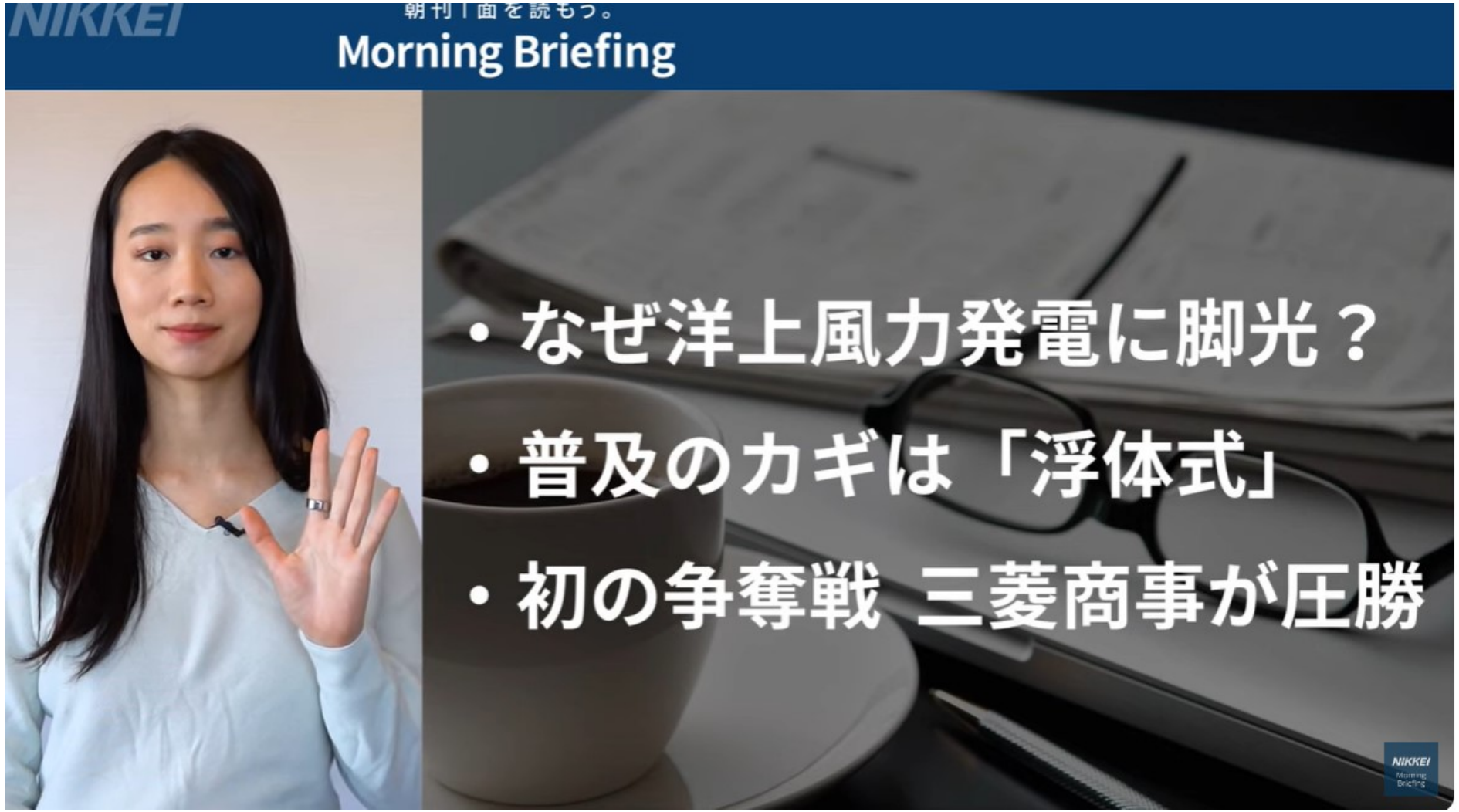
問題はないの？

終わり

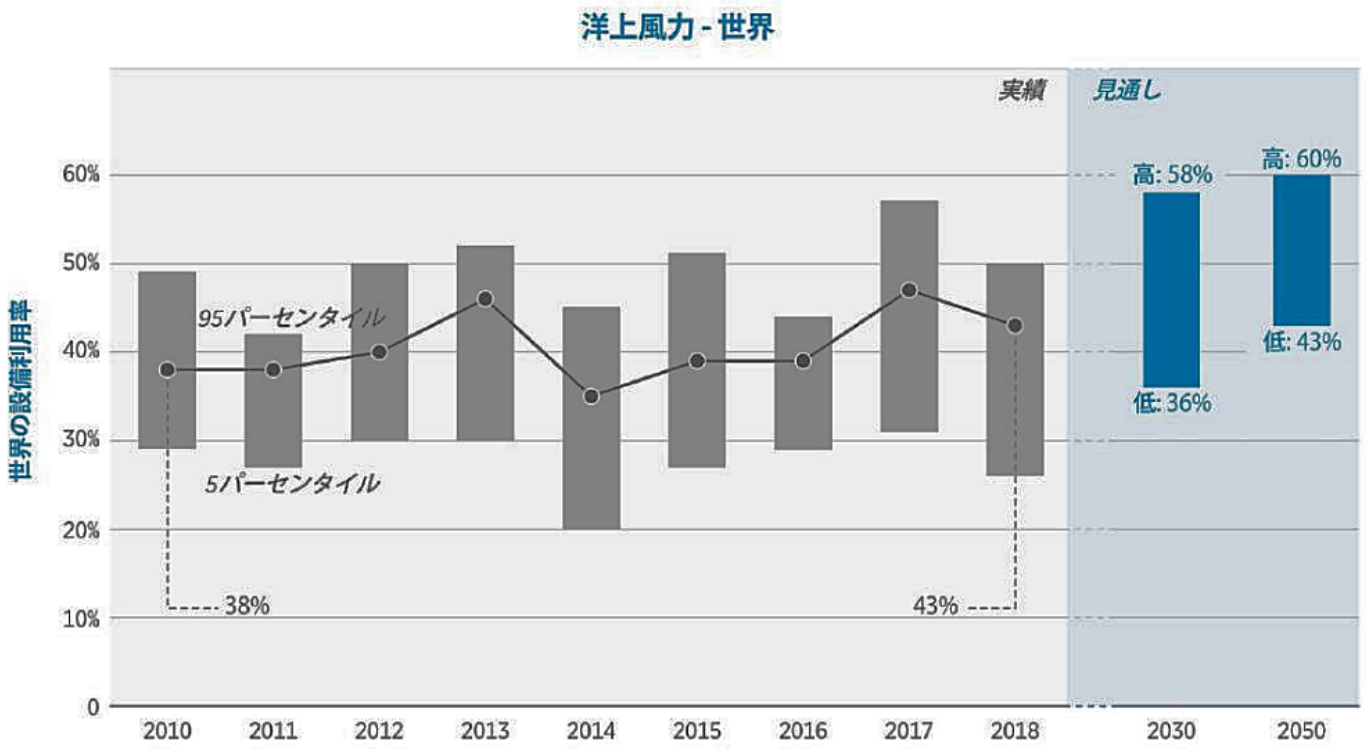
吉岡　芳夫

補足資料

【5分でわかる】洋上風力発電　再エネの大本命、なぜ三菱商事が強い？（キーワードで振り返る1週間）(youtube.com)



in 2050.



Source: Historical data based on IRENA (2019c), and future projections based on IRENA's forthcoming report Solar and wind cost reduction potential to 2030 in the G20 countries (IRENA, n.d.).

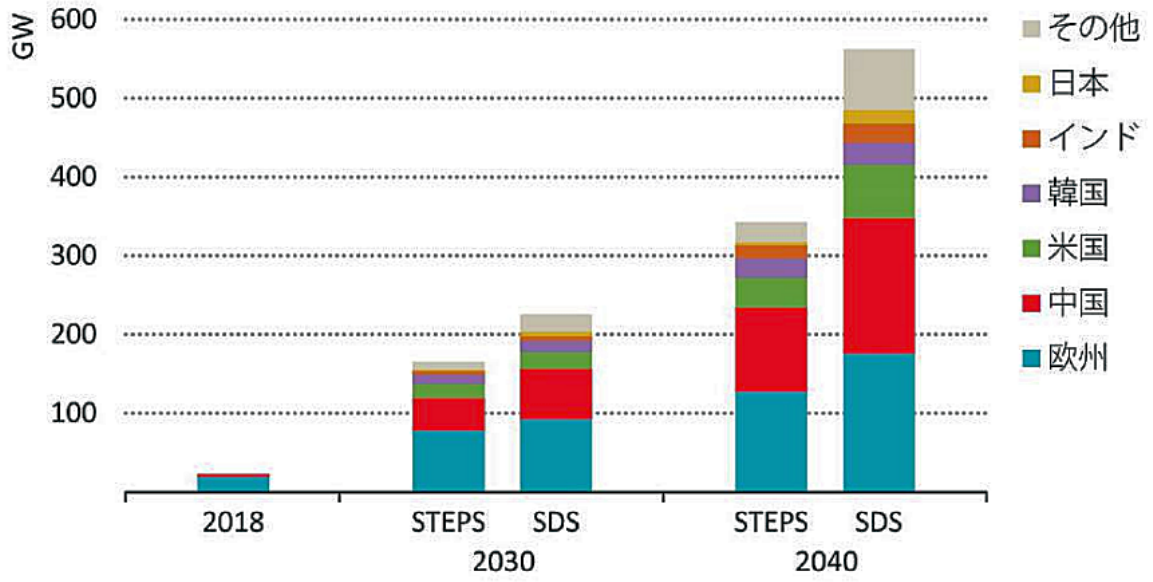
出典）IRENA "Future of Wind" Figure 23（2019年10月）

IRENA（前出）から、世界の洋上風力発電の2010年から2050年まで設備利用率（Capacity Factor：CF）の推移を図14に示す。

2018年の国際的な加重平均は43%であり、2010年の38%から進化している。技術動向だけでなくタービンの設計の改良も考慮すると、2030年のCFは36%～58%のレンジになり、2050年は43%～60%のレンジになる。

図5 洋上風力発電のシナリオ別導入見通し（IEA）

Figure 14.12 ▷ Installed capacity of offshore wind by region and scenario



European Union and China account for 70% of the global offshore wind market to 2040, but a number of countries enter the market and increase their capacity

注）STEPS：公表政策シナリオ、SDS：持続可能な開発シナリオ

出典）IEA “World Energy Outlook 2019” Figure 14.12（2019年11月）

IEA WEO 2019では、シナリオ別の導入予測を示している（図5）。

2040年の洋上風力発電導入見通しについて、「持続可能な開発シナリオ」（Sustainable Development Scenario：SDS）では世界全体で合計560GWとなっている。

これは「公表政策シナリオ」（Stated Policies Scenario：STEPS）に比べ65%多い。

前述のIRENAのレポートと比較すると、IRENAは2040年の導入量を約590GWと見積もっており、IEAよりもやや野心的であると言える。

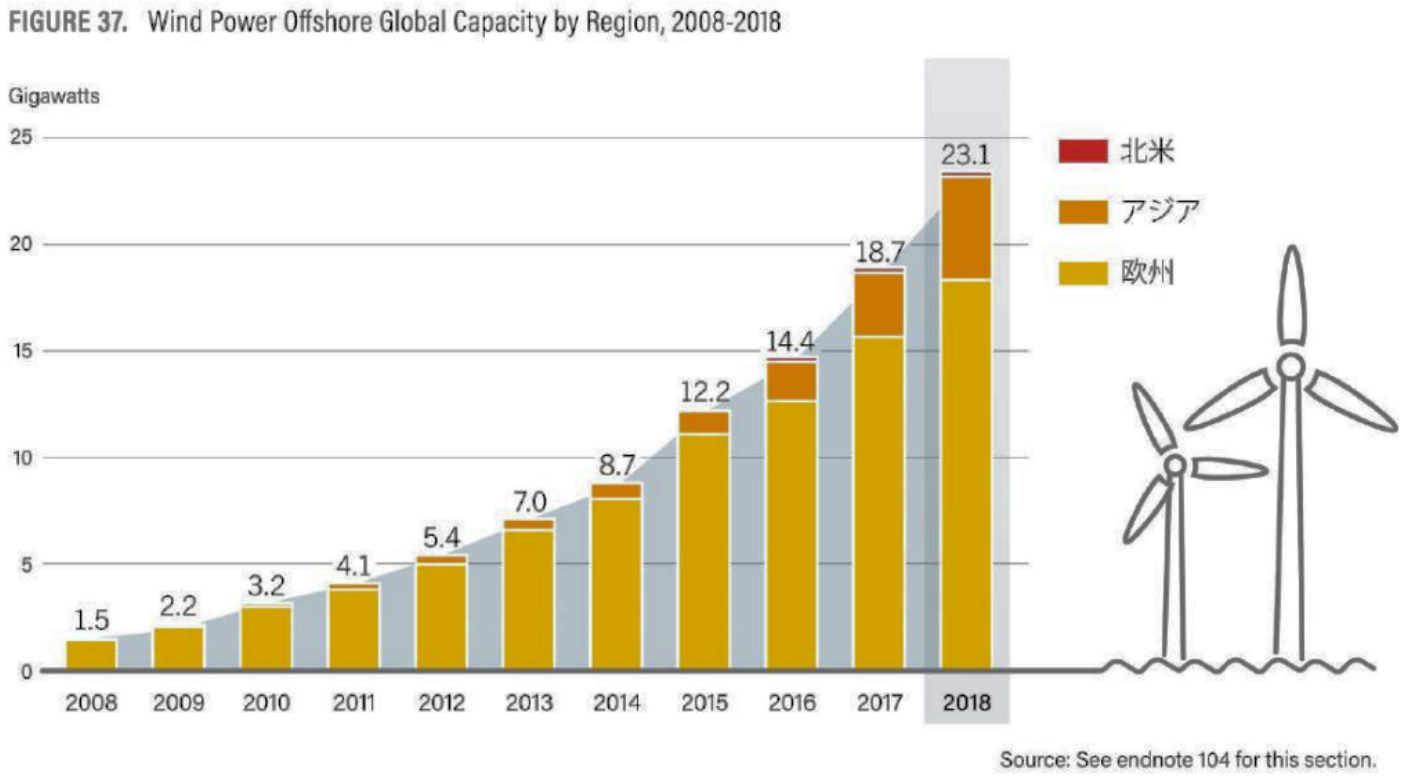
洋上風力が日本のエネルギーを支える（renewable-ei.org）

表1 洋上風力発電の地域及び国別の導入実績(GWEC)

(年)	2017		2018	
(MW)	新規導入量	累計	新規導入量	累計
合計／累計	**4,472**	**18,658**	**4,496**	**23,140**
欧州	**3,196**	**15,630**	**2,661**	**18,278**
英国	1,715	6,651	1,312	7,963
ドイツ	1,253	5,411	969	6,380
ベルギー	165	877	309	1,186
デンマーク	0	1,268	61	1,329
オランダ	0	1,118	0	1,118
その他	63	305	0	302
アジア太平洋	**1,276**	**2,998**	**1,835**	**4,832**
中国	1,161	2,788	1,800	4,588
韓国	3	38	35	73
その他	112	172	0	171
北米	**0**	**30**	**0**	**30**
米国	0	30	0	30

出典）GWEC “Global Wind Report 2018” （2019年4月）

洋上風力が日本のエネルギーを支える（renewable-ei.org）



出典）REN21 “Renewables 2019 Global Status Report” Figure 37（2019年6月）

電の世界全体の導入量は、2008年に1.5GWであったが、2018年は23.1GWに達しており、10年間で22GW近く増加し15倍以上となった。

2018年末の時点では、世界の17ヶ国(欧州11・アジア5・北米1)で導入されている。設備容量は英国が最大で8GW、続いてドイツ(6.4GW)・中国(4.4GW)・デンマーク(1.3GW)・ベルギー(1.2GW)となっている。

シェアを見ると欧州が全体の約79%を占めているが、2017年(84%)、2016年(88%)に比較すると低下傾向にあり、残りはほぼアジアである。

地域別の導入時期については、最初に欧州で英国・ドイツ・デンマークなどの導入量が伸び、次いでアジアの中国・台湾で導入が開始された。近年は、米国でのプロジェクトが発表されている。

洋上風力が日本のエネルギーを支える (renewable-ei.org)

自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

洋上風力が日本のエネルギーを支える

大量導入に向けた制度・インフラ・産業

2020年12月

区域名		万kW
促進区域	①長崎県五島市沖（浮体）	1.7
	②秋田県能代市・三種町・男鹿市沖	49.4
	③秋田県由利本荘市沖	84.5
	④千葉県銚子市沖	40.3
	⑤秋田県八峰町能代市沖	36
	⑥秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖	34
	⑦新潟県村上市・胎内市沖	35,70
	⑧長崎県西海市江島沖	42
	⑨青森県沖日本海(南側)	**60**
	⑩山形県遊佐町沖	**45**
有望区域	⑪北海道石狩市沖	91～114
	⑫北海道岩宇・南後志地区沖	56～71
	⑬北海道島牧沖	44～56
	⑭北海道檜山沖	91～114
	⑮北海道松前沖	25～32
	⑯青森県沖日本海（北側）	30
	⑰山形県酒田市沖	**50**
	⑱千葉県九十九里沖	40
	⑲千葉県いすみ市沖	41
準備区域	**⑳北海道岩宇・南後志地区沖(浮体)**	㉔富山県東部沖(着床・浮体)
	㉑北海道島牧沖(浮体)	㉕福井県あわら沖
	㉒青森県陸奥湾	㉖福岡県響灘沖
	㉓岩手県久慈市沖(浮体)	㉗佐賀県唐津市沖

※
計
調

秋田洋上風力発電 商業運転本格スタート高まる期待と課題は【Bizスクエア】（youtube.com）

https://www.youtube.com/watch?v=TJAnIWD3d9A

“洋上風力最前線”普及のカギ後編～報ステ拡大版(18/03/31)

https://www.youtube.com/watch?v=0FV7dKDt5JE

近の洋上風力発電　迫力満点ＳＥＰ船（LBS11/15放送TVh制作）

完成間近の洋上風力発電　迫力満点ＳＥＰ船（LBS11/15放送TVh制作）（youtube.com）

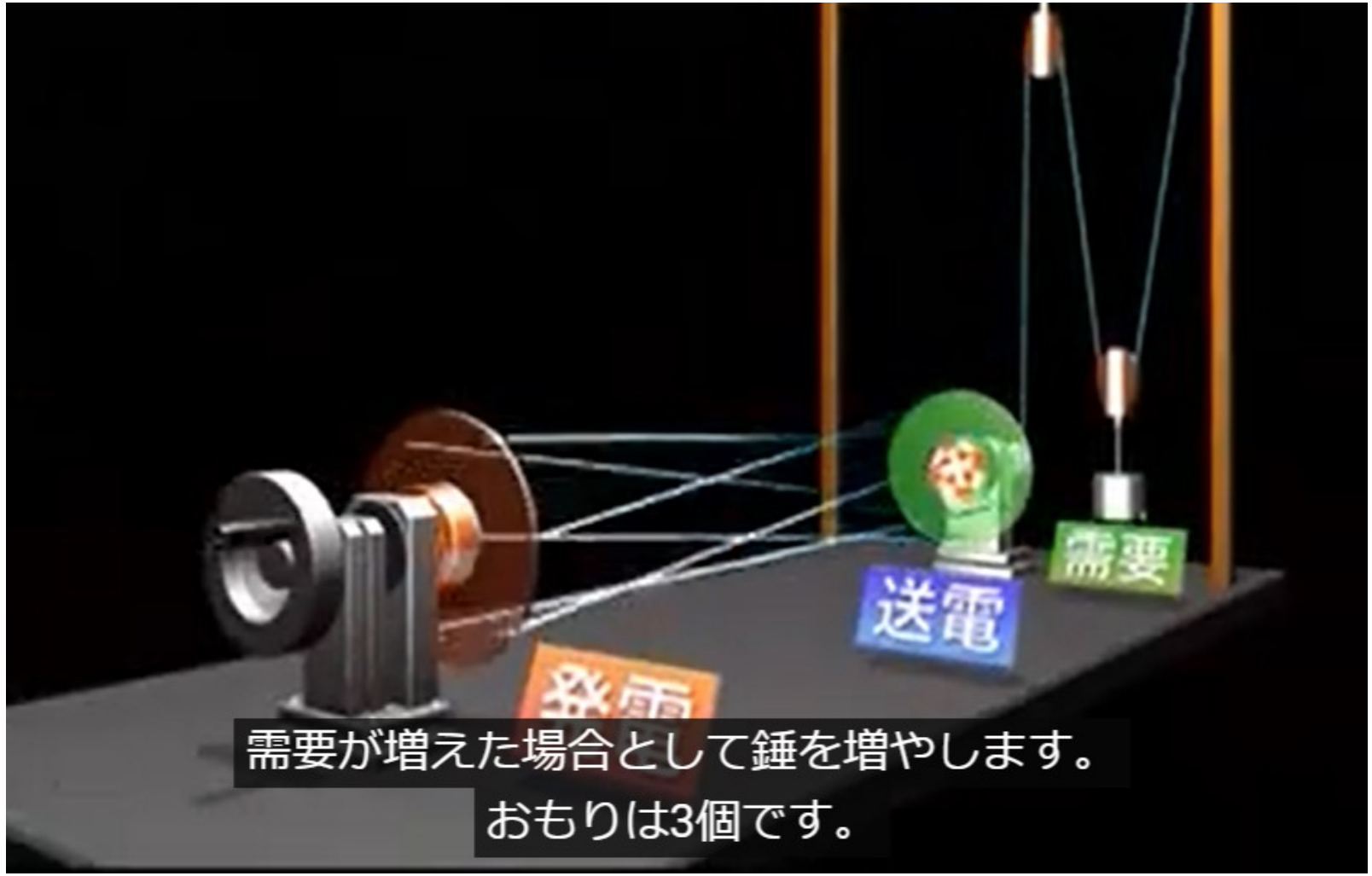
完成間近の洋上風力発電　迫力満点ＳＥＰ船（LBS11/15放送TVh制作）

https://www.youtube.com/watch?v=TkWFGvGze74

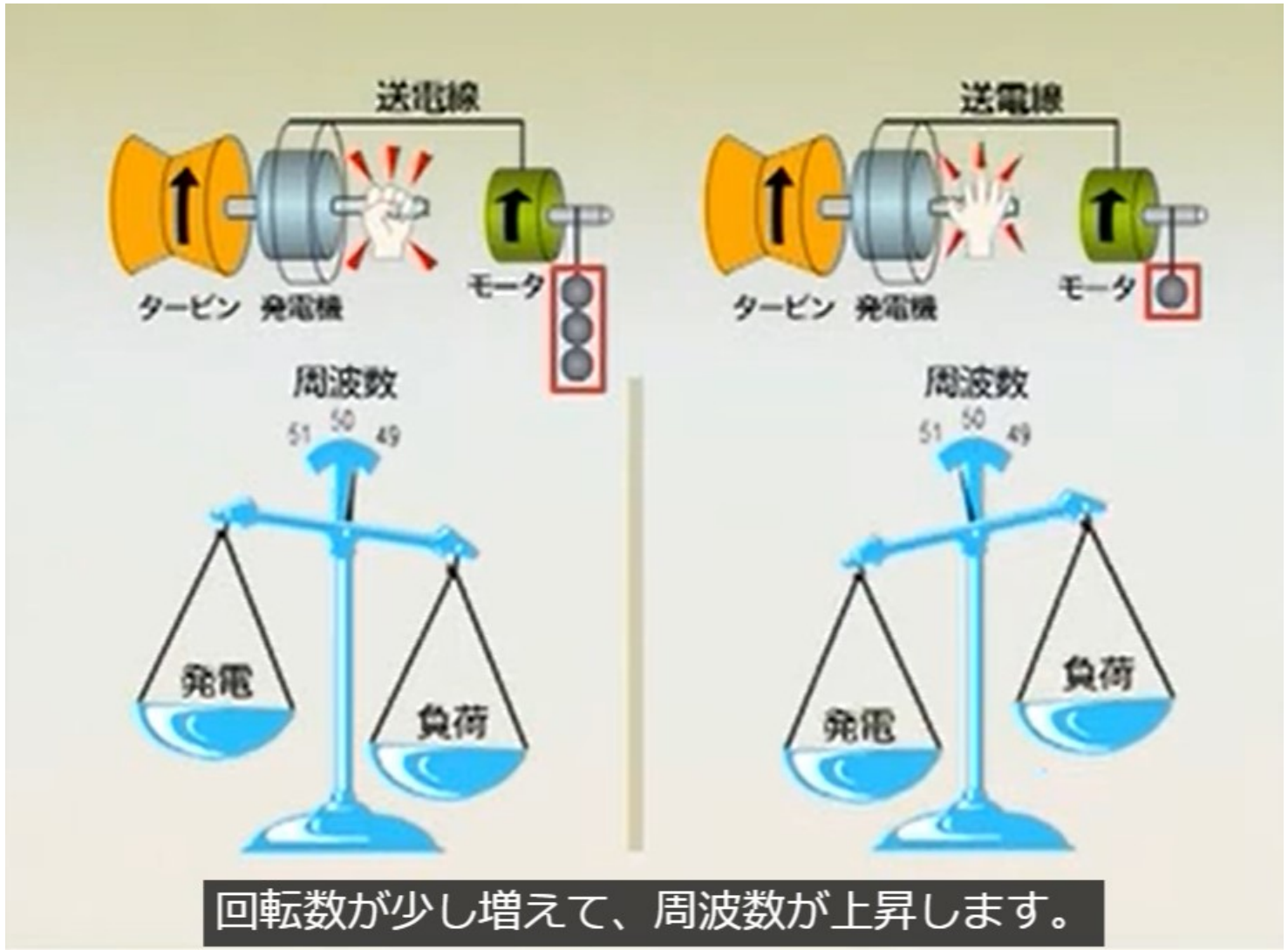
４基あわせて８万３０００世帯分の電気を…大規模洋上風力発電プロジェクトの現場が報道公開

[インフォパック] 洋上風力発電の動向：世界と日本における現状 （第4版 改訂版） | 報告書・提言 | 自然エネルギー財団 (renewable-ei.org)

https://www.youtube.com/watch?v=O6buzIeaYpU



https://www.youtube.com/watch?v=O6buzIeaYpU



武田邦彦

https://www.youtube.com/watch?v=i9S5cy2YPtA

邦彦】日本企業の全滅でわかった「風力発電のバカらしさ」

独自の風車で

【HD】Scenery of Wind Farms in the USA｜アメリカ 風車のある風景 (youtube.com)