

IEA Task26 風力発電のコスト

2022年3月1日

東京大学工学系研究科
総合研究機構 特任講師
菊地由佳



Task26の概要

2

名称: Cost of Wind Energy

目標: 一貫性、透明性のある共通の方法論を用いて過去、現在、及び将来の各国の風力発電コストの結果を整理し分析する。

活動内容: 各国のコスト分析の専門家が所定のWork (Work Package)に基づき、それぞれの国の現状及び将来の動向を分析・整理。第4期は3つのWork Packageがあり、各国の事情、関心から関与するWorkを選択。年2回のTask Meeting、毎月のWeb Meeting等を通じてディスカッション。11/23のWind Europeにて、タスクの成果発表会が行われた。

活動期間: 2009年～現在(第4期)
第4期: 2018年10月～2021年9月

参加国: 米国、英国、デンマーク、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン
EC(European Commission)、日本、アイルランド

Operating Agent(OA): Eric Lantz (NREL)

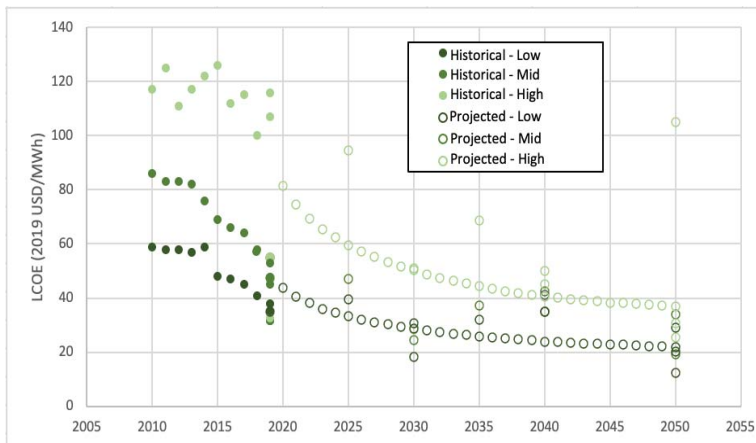


建設費 維持管理費 撤去費

発電コスト

$$LCOE = \frac{\sum_0^N (C_n + OM_n + D_n) \times (1 + r_n)^{-n}}{\sum_1^N E_n \times Avail \times (1 + r_n)^{-n}}$$

E_n : 理論発電量
 r_n : 減価償却率
 Avail: 利用可能率

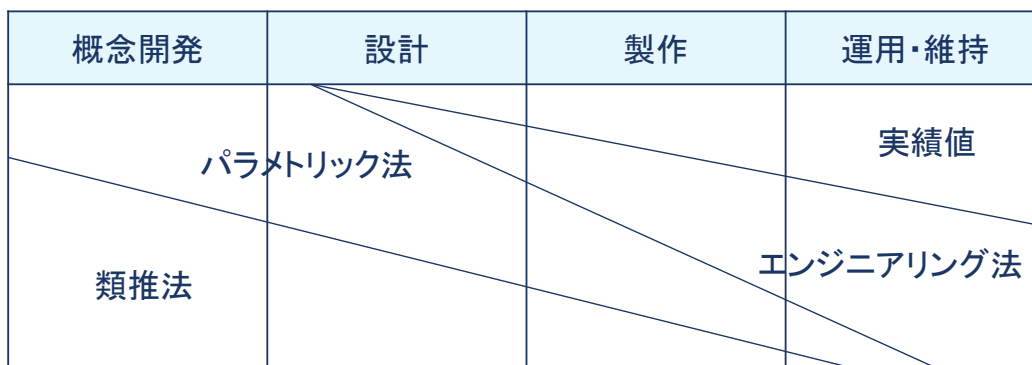


Source: Beiter et al. 2021

風力エネルギーの主電源化のためにコスト低減が求められる
 コスト評価手法を確立し、コスト低減シナリオを示す

コスト評価の主な手法

類推法	過去の類似プロジェクトを参考に見積もる
パラメトリック法	回帰式により評価する
エンジニアリング積み上げ法	コスト要素毎に工学的知見より評価する
専門家意見	専門家の意見を聞く



Integrated Defense Acquisition, Technology, & Logistics Life Cycle Management Framework
https://space.se.spacegrant.org/uploads/Project%20Life%20Cycle/DAU_wallChart.pdf
 日本コスト評価学会、コスト評価知識体系、CEBok Unit I Module 3、2011

風力エネルギーの発電コスト評価手法を確立する必要がある

活動項目	主担当機関	成果	コスト評価手法
WP1: 風力発電のコスト			
年間データベースの作成	U.S. (NREL)	HP	実績値の収集
O&Mコストのモデル化	GE (Fraunhofer), U.S.(NREL)	—	エンジニアリングモデル
技術と発電所の違いがコストに与える影響	U.S. (NREL)	論文	エンジニアリングモデル
リパワリングに関する研究	DK (DTU)	論文	実態調査
洋上風力のコスト	U.K.	レポート*	エンジニアリングモデル
陸上風力のコスト	U.S. (NREL)	レポート*	エンジニアリングモデル
WP2: 将来のコスト予測			
将来コストの予測	U.S (NREL)	論文	専門家意見
コストと性能データ整備	DK (Ea Energy Analysis)	レポート*	実績値の収集
WP3: 風力の価値			
LROEの比較	U.S.(NREL),DK(DTU)	論文	エンジニアリングモデル
蓄電池と風力の価値のモデル化	DK (Ea Energy Analysis)	レポート*	エンジニアリングモデル

第4期の活動は計画通りに行われ、成果がほとんど出揃った
*は今年出版予定

Task26 Phase4 の成果報告会

IEA TCP Wind Task 26: The changing economics of wind power in high renewables futures



When: 23 November, 14:00–17:00

Where: Meeting room 19, Level 1

Open to: All registered participants with additional registration at this link

Task 26 of IEA has facilitated extensive international research in the field of future wind energy costs levels as well as the factors that affect these. Members of Task 26 as well as guest speakers will present and discuss cutting-edge research and new insights into costs and values of offshore wind energy at this event.

Topics will include:

- Cutting wind energy costs in half by 2050 – results of an expert elicitation
- Expert perspectives on the wind plant of the future
- Market Value of Wind – perspectives from a European-wide analysis
- Value-based metrics to assess offshore wind cost
- The rise of competitive procurement in offshore wind energy
- Peek into the future: economic perspectives on floating wind, energy islands, new business models and financing concepts, new routes to market including Power-to-X

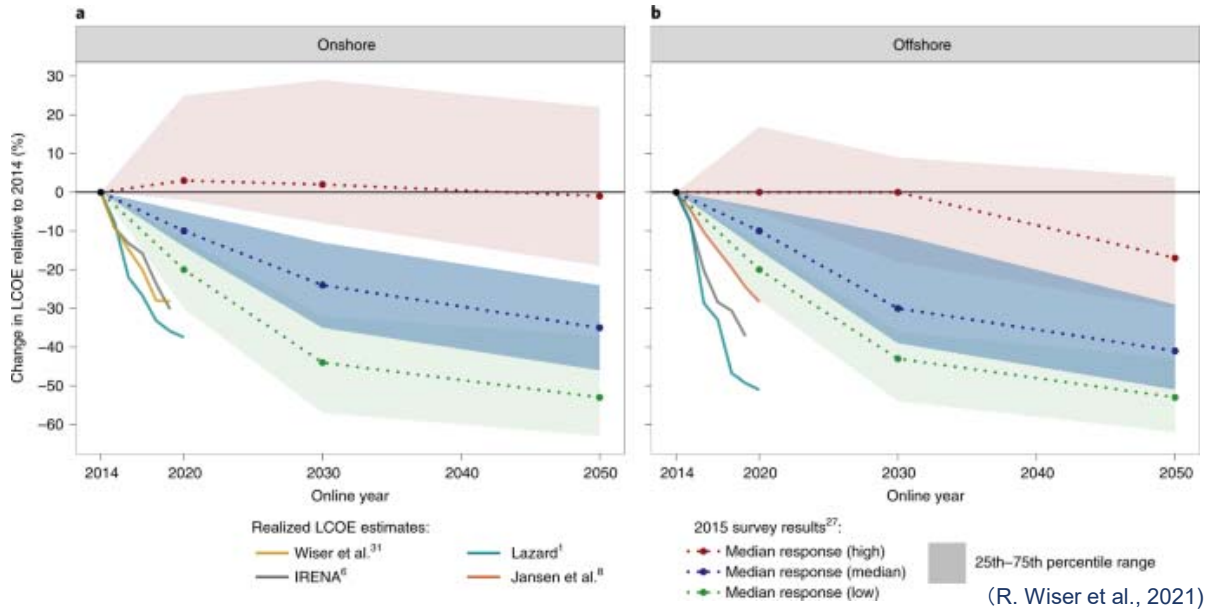
The workshop will be a combination of presentations and open discussion. The event is free to attend for registered participants. Physical participation will require an exhibition or an event pass to the WindEurope Electric City 2021.

➤ 発表資料は下記URLからダウンロード可能

<https://orbit.dtu.dk/en/projects/iea-tcp-wind-task-26-dissemination-event-the-changing-economics-o>

昨年、Wind Europe会議のサイドイベントとして、成果報告会が開催された

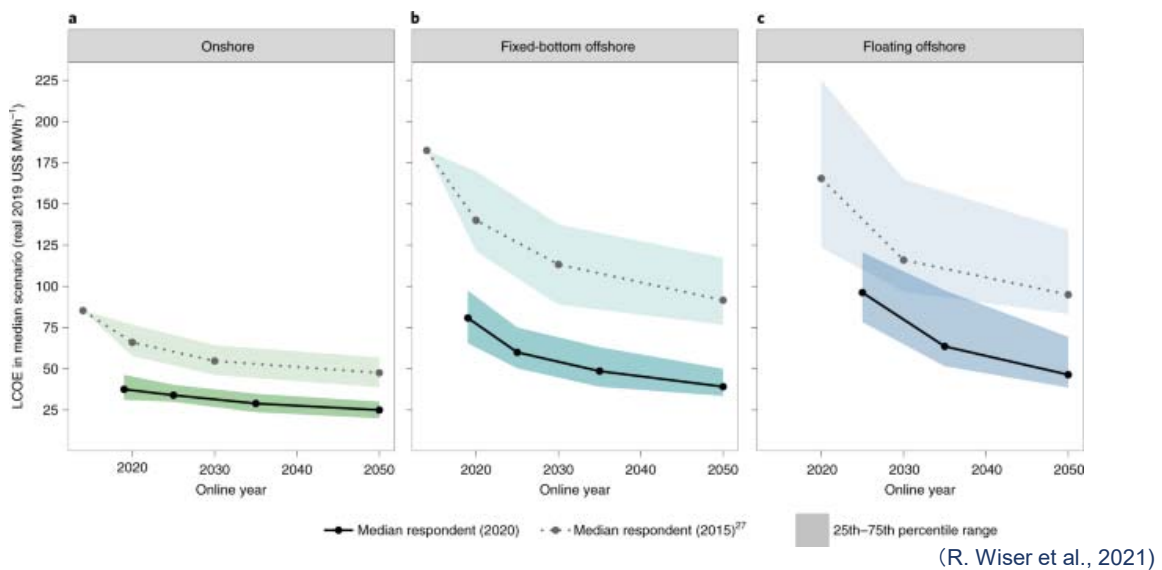
- 2015年(第3期)において、専門家意見の手法を用いた将来のコスト低減予測が実施



専門家へのインタビューにより将来コストが予測されている
 2015年に実施された調査結果よりも、実際のコスト減少率が高かった

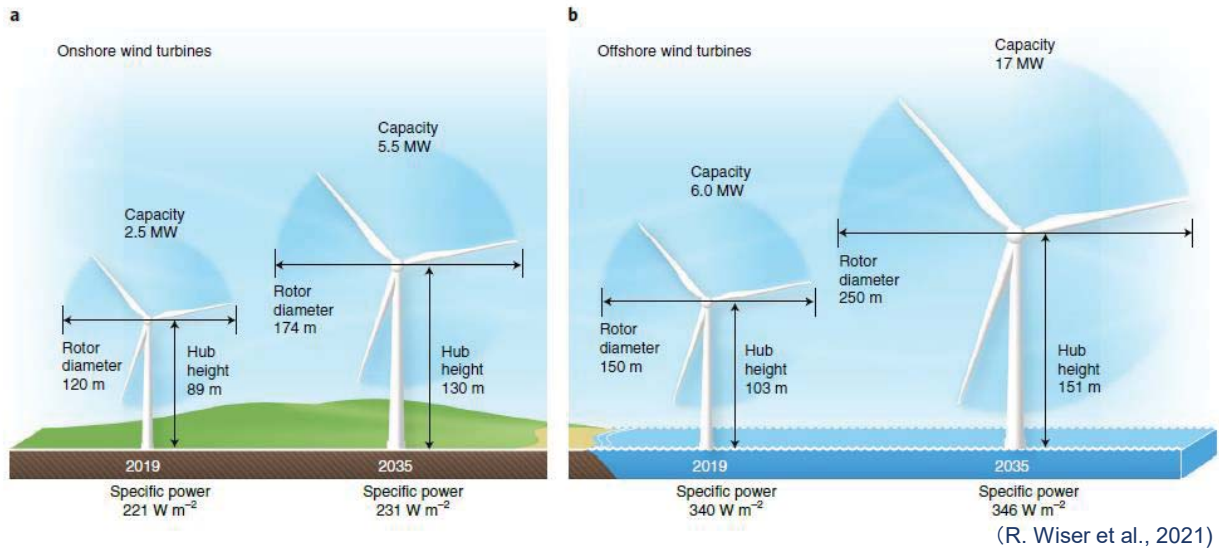
<https://emp.lbl.gov/publications/expert-elicitation-survey-predicts-37>

- 2020年7月～9月にかけて専門家へのオンラインでの調査が実施された
- 不確かさも併せて調査しているところが特徴



2050年までに37～49%のコスト低減が予測された

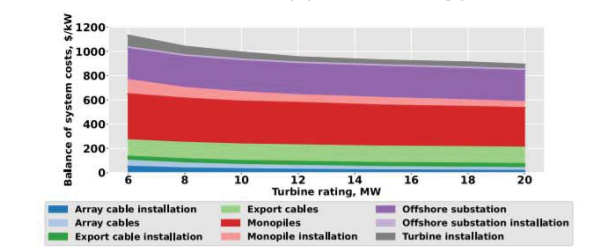
- 2020年調査の結果を踏まえて、2015年調査でコスト低減の過小評価が起こった理由の分析が行われた



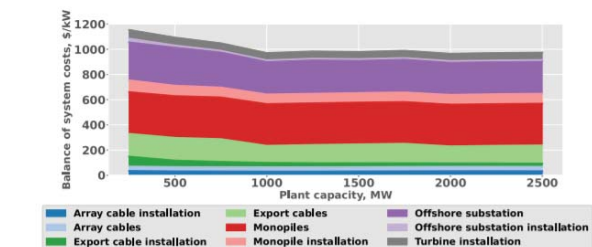
- 競争入札といった仕組みによるコスト低減効果
- プロジェクトのリスクがより理解され、予備費が少なくなった
- 風車の大型化のスピードが2015年予測時より早かった

エンジニアリングモデルによる洋上風力のコスト分析

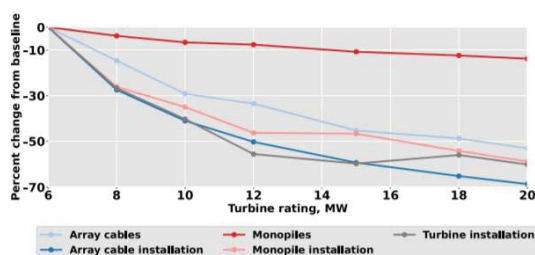
M. Shields, et al., Impacts of turbine and plant upsizing on the levelized cost of energy for offshore wind, Applied Energy, 298, 2021.



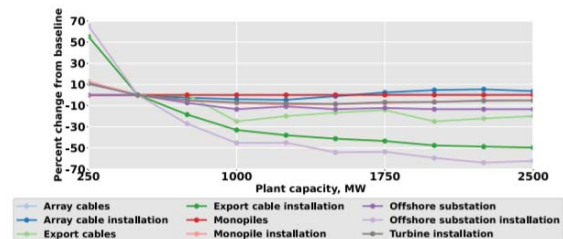
turbine upsizing on balance-of-system costs for a constant plant capacity of 1000 MW. Results are shown as a breakdown of cost magnitudes



nt upsizing on balance-of-system costs for a constant turbine rating of 10 MW. Results are shown as a breakdown of cost magnitudes 1



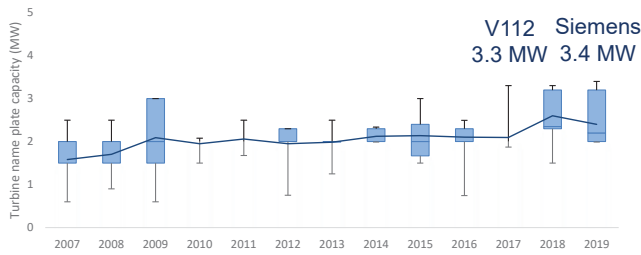
turbine upsizing on BOS costs for a constant plant capacity of 1000 MW. Results are shown as a percentage of the baseline project cost export cables that do not scale with turbine rating are not shown.



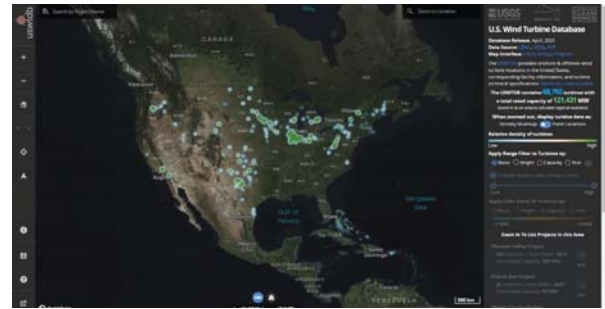
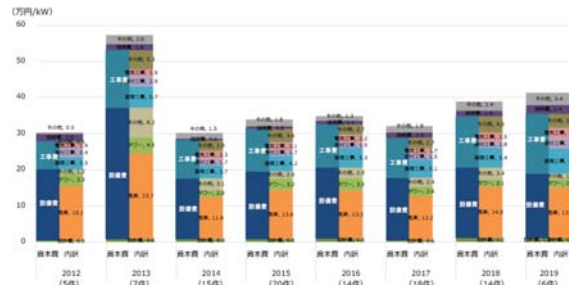
nt upsizing on balance-of-system costs for a constant wind turbine rating of 10 MW. Results are shown as a percentage of the baseline

(M. Shields et al., 2021)

発電量、CAPEX、OPEXをエンジニアリングモデルを用いて統合的に評価し、風車サイズ・発電所規模が発電コストに及ぼす影響を定量的に評価した



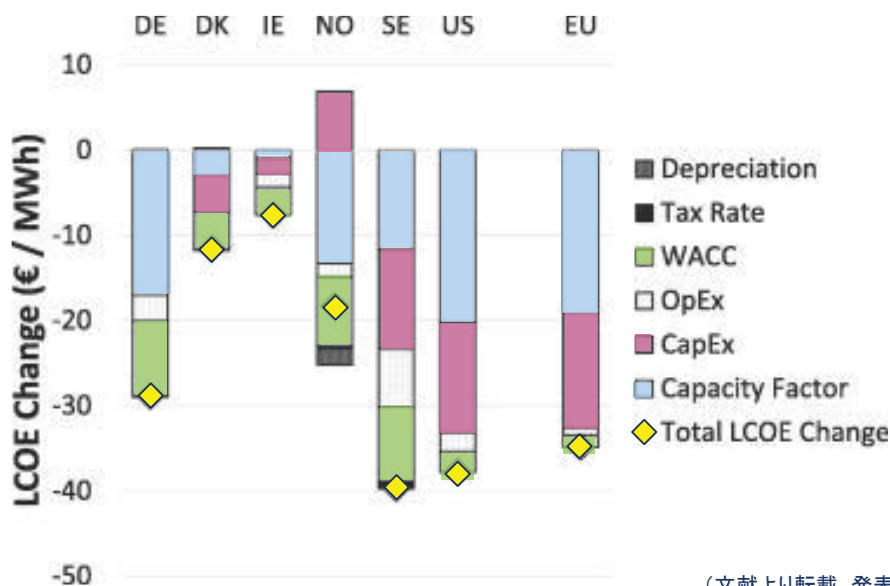
日本の陸上風力のローター直径 (Task26より)



アメリカで整備されたデータベース
<https://eerscmap.usgs.gov/uswtdb/viewer/#3.19/37.33/-90.42>

第3~4期の活動を通して、日本の風車の物理的な統計値を明らかにした
日本の風車に関するデータベースの整備が求められる

陸上風力の発電コスト低減の分析



(文献より転載, 発表者色付け)

A. Duffy et al., Land-based wind energy cost trends in Germany, Denmark, Ireland, Norway, Sweden and the United States, *Applied Energy*, 277, 2020

設備利用率の向上、WACCの低減、建設費の低減が発電コスト低減に寄与していることを定量的に評価

Expert perspectives on the wind plant of the future, <i>Wind Energy</i> , July 2021(Submitted)	WP2
Toward global comparability in renewable energy procurement, <i>Joule</i> , May 2021	WP3
Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050, <i>Nature Energy</i> , 2021	WP2
Wind power costs driven by innovation and experience with further reductions on the horizon, <i>WIREs Energy and Environment</i> , 2021	WP1
Multifaceted drivers for onshore wind energy repowering and their implications for energy transition, <i>Nature Energy</i> , 2020	WP1
Land-based wind energy cost trends in Germany, Denmark, Ireland, Norway, Sweden and the United States, <i>Applied Energy</i> , 2020	WP1

WPの主要な成果について論文が出版された
日本は赤字で示した2本の出版に参加した

名称: **Wind Energy Economics**
- The changing economics of wind power in high renewable futures -

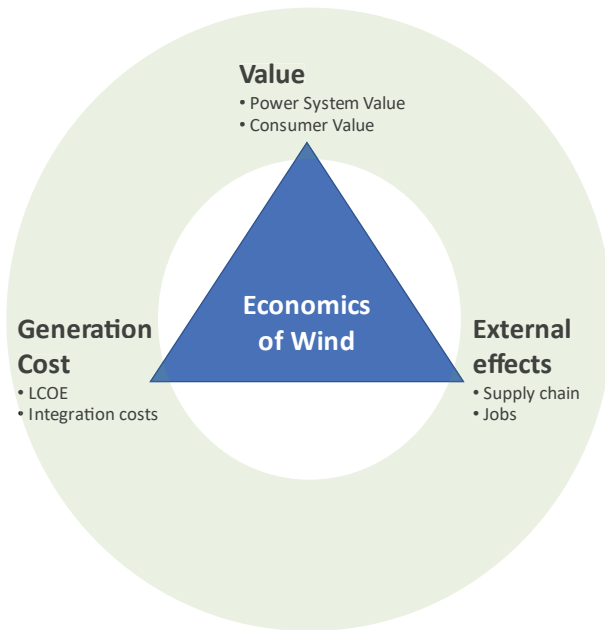
目標: 一貫性、透明性のある共通の方法論を用いて、来たる低炭素化社会における
風力発電大規模導入下での各国の風力発電コストと価値を評価する。

活動内容: 各国のコスト分析の専門家が所定のWork(Work Package)に基づき、
それぞれの国の現状及び将来の動向を分析・整理。6つのWork Packageが
提案されている。
年2回のTask Meeting、毎月のWeb Meeting等を通じてディスカッション。

活動期間: 2009年～
第5期: 2021年12月1日～2025年11月30日

参加国: 米国、英国、デンマーク、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン
EC(European Commission)、日本、アイルランド、オランダ

Operating Agent(OA): Eric Lantz (NREL)

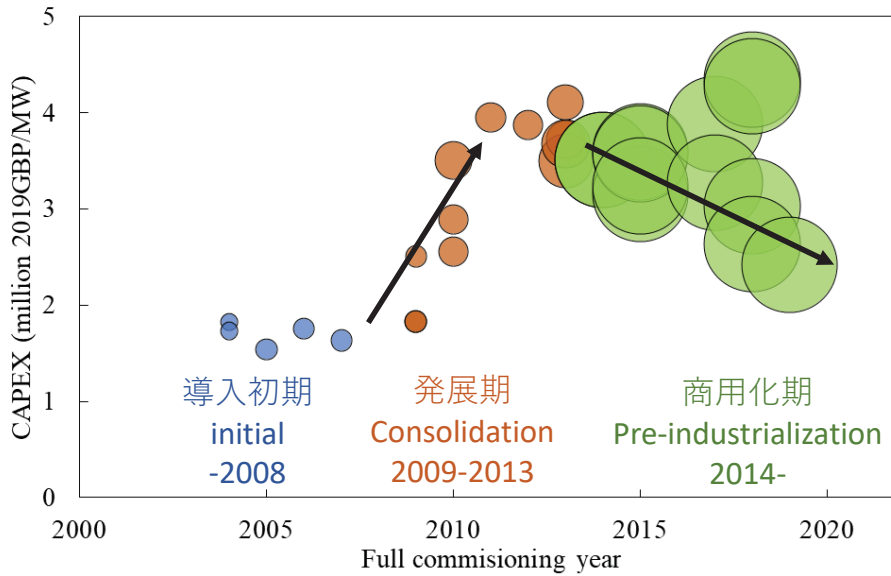


- Power Sector Trends**
 - Deep de-carbonization
 - Siting constraints
 - Use of hydrogen
- Emerging Wind Technologies and Solutions**
 - Integrated transmission
 - Larger turbines
 - Integrated and industrialized supply chains
- Performance Metrics**
 - Holistic cost and value metrics
 - Metrics for new wind applications (e.g., in consideration of hydrogen and storage)
 - Uncertainty

水素・蓄電池・送電システムを考慮し、電力システムとして風力エネルギーの経済性を評価しようという枠組みが提案されている

WP名	題目と内容
WP1	<p>“風力発電所の設計・運転維持管理・価値は、脱炭素化に伴い、どのように変化するか？”</p> <p>専門家意見 (Expert elicitation) の手法を用いて、風力発電所の技術、設計、運転維持管理について現在検討されている技術革新について調査する。</p>
WP2	<p>“個別の技術革新、運転維持管理方法はコストと価値にどのように影響を与えるか？”</p> <p>エンジニアリングコストモデルを構築し、技術、設計、維持管理の革新がコストに与える影響を調査する。地域と送電線のタイプに対して比較のケーススタディを実施する。</p>
WP3	<p>“不確かさは風力発電のコスト、価値と金融にどのように影響を与えるか？”</p> <p>現在進んでいる金融コストにたいする専門家意見を調査し、結果を分析することにより、不確かさやリスクが実際に及ぼす影響について調査する。次に、これらの不確かさがLCOEに与える影響を明らかにする。最後に、シナリオベースの風力の金融コストの予測モデルを構築する。</p>
WP4	<p>“どのようなデータと分析手法が、現在と過去の風力発電コストをより良く理解するためにふさわしいか？”</p> <p>毎年の各国の風力発電に関する技術・経済に関するデータの調査を行うとともに、発電コスト等による経済性評価手法の提案と検証を行う。</p>
WP5	<p>“新しい送電網と水素はコストと価値にどのように影響を与えるか？”</p> <p>シナリオ研究により、参加国が保有しているモデルを用いて、水素と送電線がコストと価値に与える影響を評価する。</p>
WP6	<p>“成熟した将来の市場においてサプライチェーンはどのように発展し変化するか？”</p> <p>2030年、2050年までの雇用創出数、売り上げ規模といった将来の価値を評価 認証機関、EPDやその他から風車の部品とその製造拠点を調査する。さらに、その地域で作られられる価値について評価する。</p>

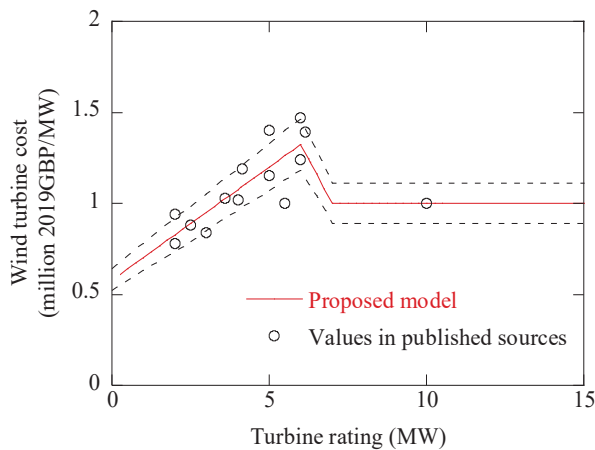
- イギリスで、既に運開された33個の商用洋上風力発電所 (9.95 GW in 2019)
- 3つの時期に分けられる (R. Lacal-Aránategui et al. 2018)



菊地由佳, ジラウオンサパン・ピッチャポン, 石原孟: エンジニアリングモデルを用いた着床式洋上風力発電所のコスト評価に関する研究, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム, 2021

風力発電機コスト

$$C_{WT} = \begin{cases} (a_{wt} \times P + b_{wt}) \times P \times N & P < 6 \text{ MW} \\ (c_{wt} \times P + d_{wt}) \times P \times N & 6 \text{ MW} \leq P < 7 \text{ MW} \\ e_{wt} \times P \times N & 7 \text{ MW} \leq P \end{cases}$$



ビジネス環境の変化により7MW以降の風車コストをMWあたり一定とした

支持構造物コスト

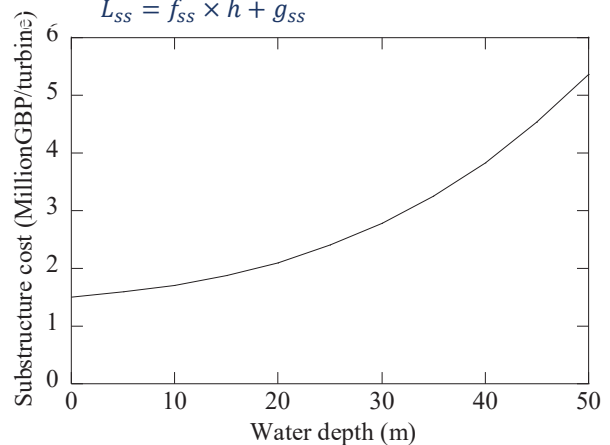
$$C_{SS} = C_{SS-fabrication} + C_{SS-material}$$

$$C_{SS-material} = \pi D_{SS} t_{SS} L_{SS} \times \rho_{steel} \times C_{steel} \times N$$

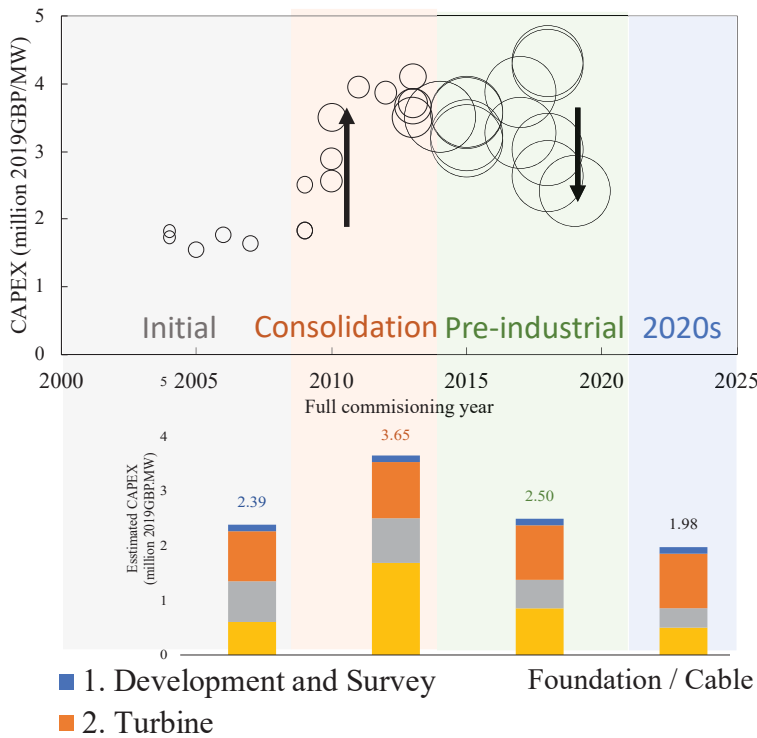
$$D_{SS} = \max(4, a_{SS} \times h^2 + b_{SS} \times h + c_{SS})$$

$$t_{SS} = d_{SS} \times h + e_{SS}$$

$$L_{SS} = f_{SS} \times h + g_{SS}$$



支持構造物において材料費に加え、製作費を新たに定数として考慮した



- 発展期では、水深と離岸距離の増加に伴い、支持構造物・送電ケーブル費が増加したが、風車の大型化がその影響を相殺した。建設船の大型化と保険料の増加が大きな影響を持つ
- 商用化期では、風車の大型化がコスト低減に繋がった (Cost / MW)
- 15 MW 風車と船舶賃料の低減により、CAPEXは導入初期より低減している

日本は発展期に位置すると考えられ、イギリスの低減メカニズムを日本に適用して低減シナリオを考えることが可能

$$LCOE \times \sum_{n=0}^N E_n \times (1 + r_n)^{-n} = \sum_{n=0}^N (C_n + OM_n + D_n) \times (1 + r_n)^{-n}$$

		イギリス	日本
発電コスト	LCOE	7 円/kWh	20 円/kWh
建設費	CAPEX	32.6 万円/MW	51.2 万円/MW
維持管理費	OPEX	1.04 万円/MW/年	1.84 万円/MW/年
撤去費	DECEX	4.2 万円/MW	10.7 万円/MW
設備容量	CF	50 %	33 %
運転年数	N	25 年	20 年

8-9 円/kWh は欧州を参考にした発電コストである
日本において実現可能な発電コストの低減シナリオを
定量的に評価する必要がある

コスト低減 方策	現状	CAPEX+DECEX		OPEX		Extension
		施工の 効率化	風車の 大型化	点検と軽微補 修の効率化	大型部品修繕の 効率化	耐用年数 の延長
シナリオ	Baseline	1.1	1.2	2.1	2.2	3
建設費 (万円)	51.2	28.6	25.8	25.8	25.8	25.8
運転維持費 (万円/kW/年)	1.84	1.84	1.84	1.40	1.04	1.04
撤去費 (万円)	10.7	5.7	4.3	4.3	4.3	4.3
運転年数(年)	20	20	20	20	20	25
利用可能率(%)	95	95	95	96	97	97
発電コスト (円/kWh)	20	13.9	13.0	11.4	10.1	9.1

建設費と撤去費の減少により7円/kWh、維持管理費の減少により3円/kWh、耐用年数の延長により1円/kWhの減少となった

Task26の活動

- 第4期の活動を終え、コスト低減の定量的な評価手法を様々に適用し、手法の有用性や更なる課題が明らかとなった
- 第5期は、水素・蓄電池といった技術との組み合わせや、送電システムを考慮したエネルギーシステム全体での風力エネルギーの経済性について研究していく

Task26を受けた日本での活動

- 第5期では、エンジニアリングモデルの分野でTask26に貢献していく予定
- 日本としては、Task26で得た知見を持ち帰り、浮体式洋上風力発電のコスト低減に向けて、エンジニアリングモデルを用いたコスト低減シナリオを評価していくことを考えている