

パネルディスカッション 3 : エネルギーシステム

目的

- ・風力発電市場へのより効率的な導入

環境共創

Environmental
Co-Design

社会科学

Social Science

Task53

(風力発電の経済性)

風車発電のコストと価値の分析

風力発電のコストの最適化

Task25

(変動電源大量導入時の
エネルギーシステムの設計と運用)

変動性再生可能エネルギーの大量導入を促進
電力システムの運用に関する知識と経験

風車

The Turbine

未来 :

風力発電エネルギー
が世界のエネルギー
需要の50%を供給

大気

The Atmosphere

風力発電と電力網

The Plant and Grid

共通キーワード

Task25（変動電源大量導入時のエネルギーシステムの設計と運用）

項目	内容
目的	<ul style="list-style-type: none">・エネルギーシステムへの変動性再生可能エネルギーの大量導入を促進する最も経済的に実現可能な方法に関する情報の提供・風力発電が大量導入された電力システムの運用に関する知識と経験の情報交換
概要	風力がエネルギーシステムに与える影響と緩和策を評価するための方法論の推奨
参加者（敬称略）○：主担当者	○安田陽（Univ. of Strathclyde），田辺隆也（電中研），荻本和彦（東大）
スケジュール	2021年1月～2024年12月の4年間
ワークプラン（WP）	WP1：系統計画，WP2：需給調整，WP3：安定度，WP4：電力市場
活動状況	<ul style="list-style-type: none">・運用中の風力発電の価値を最大化する・再生可能エネルギー100%シェアに向けて
課題	<ul style="list-style-type: none">・再生可能エネルギーの系統連系（エネルギー統合）に関する情報や概念が日本と世界で乖離・Task25の情報発信と理解促進
主な成果	<ul style="list-style-type: none">・各フェーズの報告書（翻訳），ファクトシート（翻訳），・RP16（PVPS Task14と共同）・出力抑制国際比較の共同論文 （Renewable and Sustainable Energy Review, Vol.160, May 2022, 112212）・柔軟性チャートの共同論文 （Renewable and Sustainable Energy Review, Vol.174, March 2023, 113116）
日本の取り組みと展開	<ul style="list-style-type: none">・柔軟性チャートが国際再生可能エネルギー機関(IRENA)で引用・報告書の翻訳を通じた国内への情報普及と啓発・共同論文の作成およびNEDOプロ成果の国外発表

Task53 (風力発電の経済性)

項目	内容
目的	高い普及率下での未来における風力エネルギーの設計，運用等の傾向を予測し，コストと価値を含む風力エネルギーの経済的提供への影響を理解する
概要	
参加者 (敬称略) ○ : 主担当者	○菊地由佳 (東京大学) , 木村啓二 (大阪産業大学)
スケジュール	2022年～2025年の4年間
ワークパッケージ (WP)	WP1 : 設計・管理の技術調査 WP2 : 技術革新の経済影響 WP3 : 不確実性とリスクの影響 WP4 : 経済性評価の在り方 WP5 : 系統と水素 WP6 : サプライチェーン
活動状況	・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？ 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。
課題	・エンジニアリングコストモデルを更新し，新しい技術によるコスト低減効果を評価する予定 ・国内外の入札等に関する結果を随時共有し，欧州での議論の情報収集を行うとともに，国内の分析に反映していく。
主な成果	・CfD制度が補助金というよりもリスクマネジメントとしての効用を持つことを論じた論文を出版(2023.12)
日本の取り組みと展開	・エンジニアリングモデルを用いて技術革新によるコスト低減量の評価手法を構築した。他国への展開・最新技術によるコスト低減を分析する。



IEA Wind Task25の活動を鑑みた 系統技術研究の方向性

— ネットゼロ電力系統の実現に向けて—

田辺隆也(電力中央研究所)

第13回IEA Wind セミナー

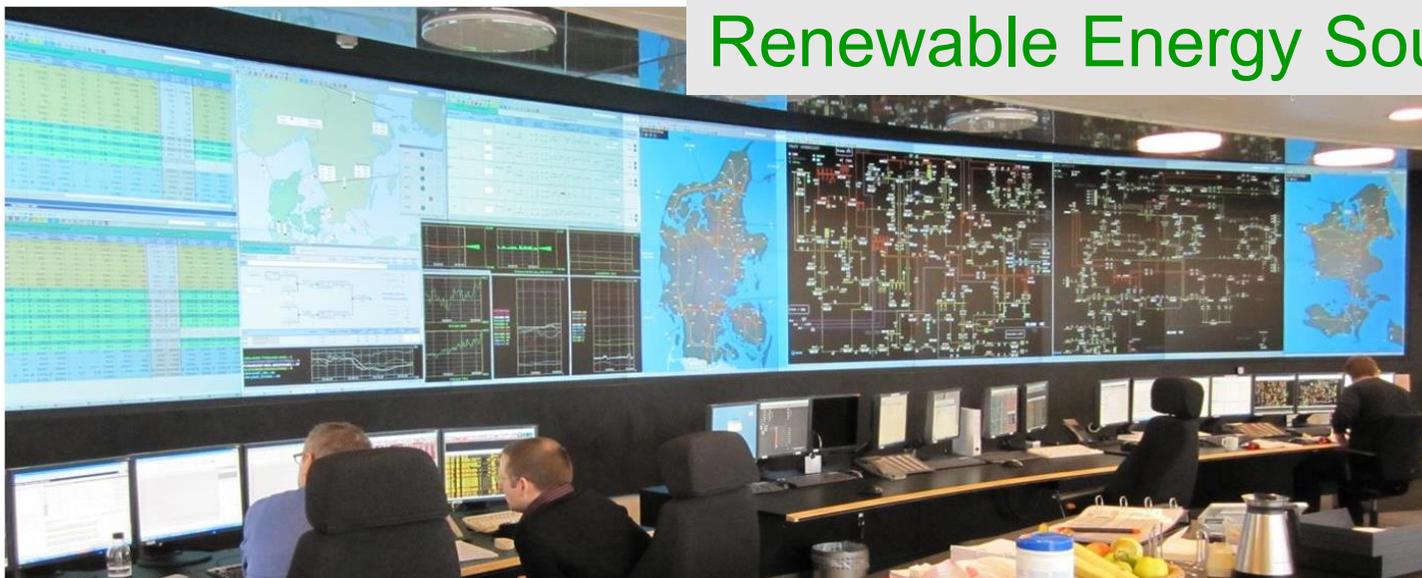
2024年9月10日

内容

(ネットゼロ電力系統の実現に向けた;)

- ◆ Task25の活動概要(目的, 挑戦・手段, 提言)
- ◆ 我が国の2050年頃の将来系統(背景, 状況)
- ◆ 系統技術研究の方向性(コンセプト)

VIBRES – Variable Inverter Based
Renewable Energy Sources



ENERGINET

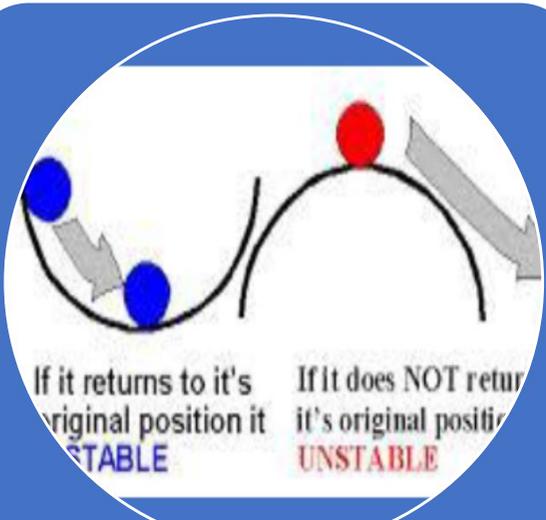
Task25: 目的

◆ Task25: Design and Operation of Energy Systems with Large Amounts of Variable Generation

- 風力・PV等の変動電源が，エネルギーシステムに与える影響を評価し，悪影響を緩和するための方法を提言

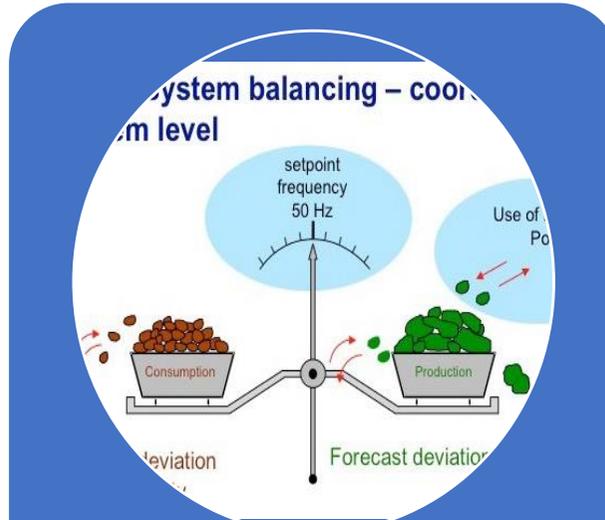


Task25: 再エネ主力電源化への挑戦



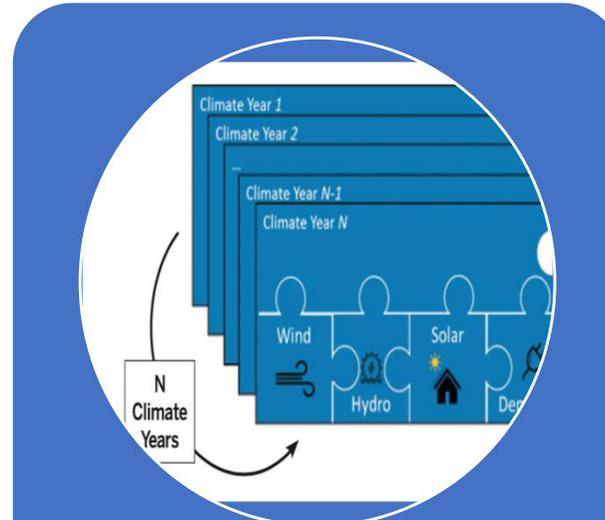
安定性

- 系統の低慣性・低短絡容量問題への対応
- 事故時の安定性確保
- レジリエンスの確保



短期的バランス

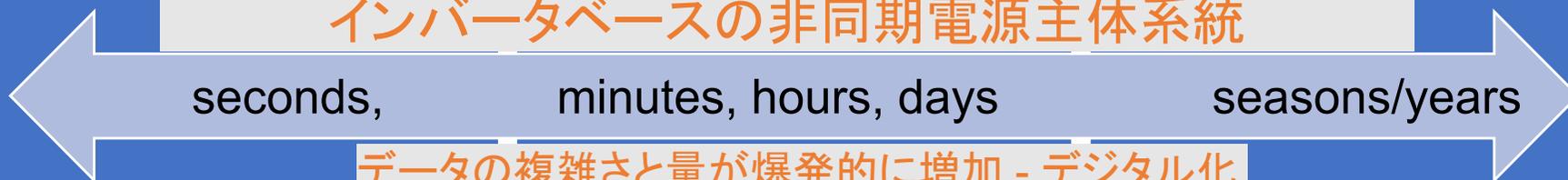
- 需給バランスの維持
- 柔軟性の確保



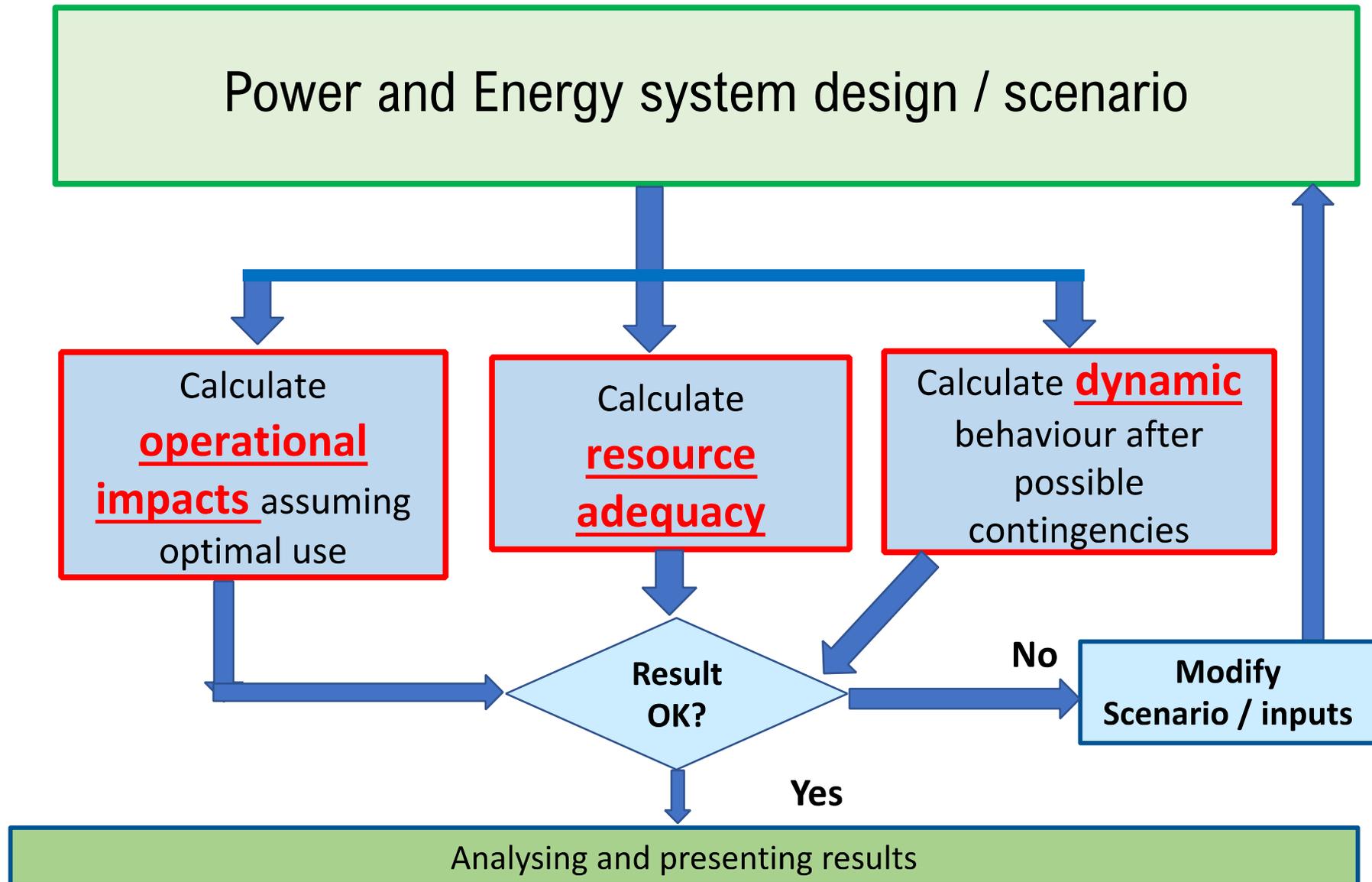
長期的バランス

- 信頼性・アデカシー
- 異常気象・天候依存
- 電力貯蔵・需要の計画

VIBRES – Variable Inverter Based Renewable Energy Sources
インバータベースの非同期電源主体系統



Task25: 系統へ影響評価 (Integration Studies)



Task25 : 提言の概要

Larger areas

- 安定性のための同期システムの構築
- バランシングとアデカシーのためのリソース共有

Complexity

- VIBRESの詳細を把握する計算負荷増大への対応
- 天候依存事象のための時系列分析(より広いエリアを高解像度に解析)

Demand and storage

- 柔軟性の高い需要や電力貯蔵
- エネルギー・システム・カップリングの拡大

Model integration

- 系統計画と系統運用の協調解析
- そのための解析・評価の方法の確立とデータ準備
- UC(起動停止計画)ED(経済負荷配分)への安定性制約の考慮

Cost vs. risk

- 信頼性評価手法の確立
- 需要の価格弾力性と柔軟性の拡大

【2050年の想定】 電力系統を取り巻く環境

- ◆ 脱炭素化要請、レジリエンス強化を背景に、2020年6月「**エネルギー供給強靱化法**」が成立

加速

- ◆ エネルギー基本計画の実現に向けた更なる取組が加速
 - 非効率石炭火力のフェードアウト
 - 基幹送電線の利用ルールの抜本見直し、等々

低炭素化社会

カーボンニュートラルへ
再エネ主力電源化、蓄電池導入拡大

社会状況/技術革新

人口減少・高齢化・疎密拡大・老朽化
AI/IT・デジタル技術・水素技術の進展

パワエレ機器の増大

電源/負荷のインバータ化
洋上風力拡大・HVDC連系

電力システム改革

広域メリットオーダの追及・競争激化
多様なエネルギービジネスの出現

地球環境の変化

気象の極端化・激甚化
大規模災害の高頻度化

【2050年の想定】 電力系統の状況

■ 広域連系の拡大

- ・地域間連系の拡大
- ・洋上風力等の大規模再エネの連系・HVDC送電の拡大

■ 需給構造の変化、変換器主体系統

- ・再エネ大量導入、蓄電池導入の拡大、需要の能動化
- ・同期機比率の減少

構造的
変化

● 系統特性の変化

慣性・同期化力・短絡容量の低下
周波数/電圧調整能力の低下

● 負荷特性の変化

周波数/電圧特性の鈍化
系統の自己制御性の鈍化

機能的
変化

■ 系統運用の複雑化、系統状況の不確実化

- ・系統制約の顕在化・拡大
- ・系統利用ルールの多様化、広域運用の拡大
- ・高変動・極端化を含む不確実な系統状況
- ・レジリエンス確保の困難化、相互運用性の要請

2050年想定からの将来系統の状況

◆ 系統の特性・性能の変化への対応が課題

➤ 拡大する連系系統

➤ 需給構造変化を伴う変換器主体系統

➤ 高変動・極端化を含む複雑・不確実化



研究の方向性を考える上での基本的な留意点

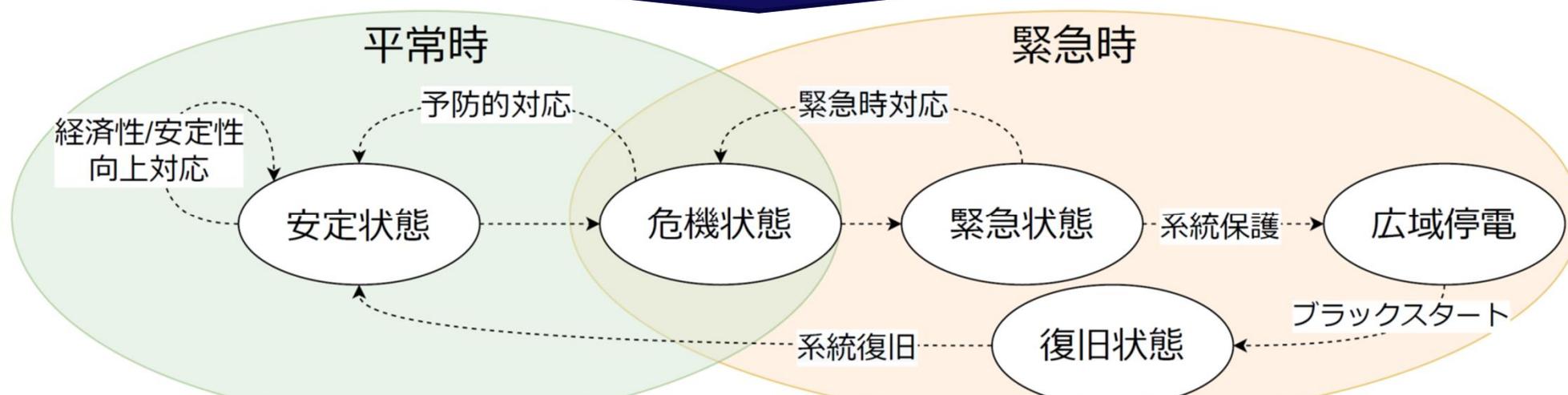
◆ 技術課題を解決する手段（基盤技術）に不足はないか？

- 将来系統の状態を、過不足なく精緻に、モデリング・シミュレーション・解析・評価・最適化するための基盤技術を確立

◆ 将来を見据えた技術課題に抜けや盲点はないか？

- 平常時ならびに緊急時の系統状態の両面から網羅的に技術課題を整理

広域運用の拡大、系統運用の複雑化、系統状況の不確実化
 同期機比率減少（慣性・同期化力・短絡容量の低下）、負荷特性の変化



系統全体を多面的・総合的に最適化する系統ソリューションの探究

系統技術研究の方向性（コンセプト）

- ◆ 気象の極端化・激甚化や大規模災害の高頻度化が進行
- ◆ 一方で、**カーボンニュートラル**に向けた政策が先行加速
- ◆ 電力システム改革と相俟って、より**厳しいコスト意識**が要求

研究の主軸

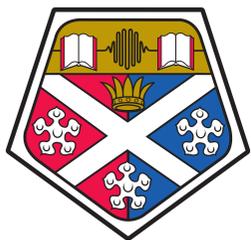
- ◆ **（先ずやるべきこと）** 将来の系統を形造る（系統の特性・性能を決める）であろう「**グリッドコード(Grid Codes)・アンシラリーサービス(Ancillary Services)**」にコミットする研究
 - 「系統を構築・利用するルール」が矢継ぎ早に決められてしまう懸念
 - 後でとならないよう、先んじて主導的に**将来系統のあるべき姿**を描く必要
- ◆ **将来系統の最適化**を実現する系統技術の研究
 - 平常時：系統計画・運用の更なる合理化・効率化（最適化）によるコスト低減，系統全体での柔軟性確保（**系統制約の克服**）
 - 緊急時：実効性の高い系統安定化とレジリエンスの確保（**系統の強靱化**）

Thank you
for your kind attention!



第13回
IEA Wind セミナー

2024年9月10日



パネルディスカッション エネルギーシステム

Institute for
Sustainable
energy
policies **isep**

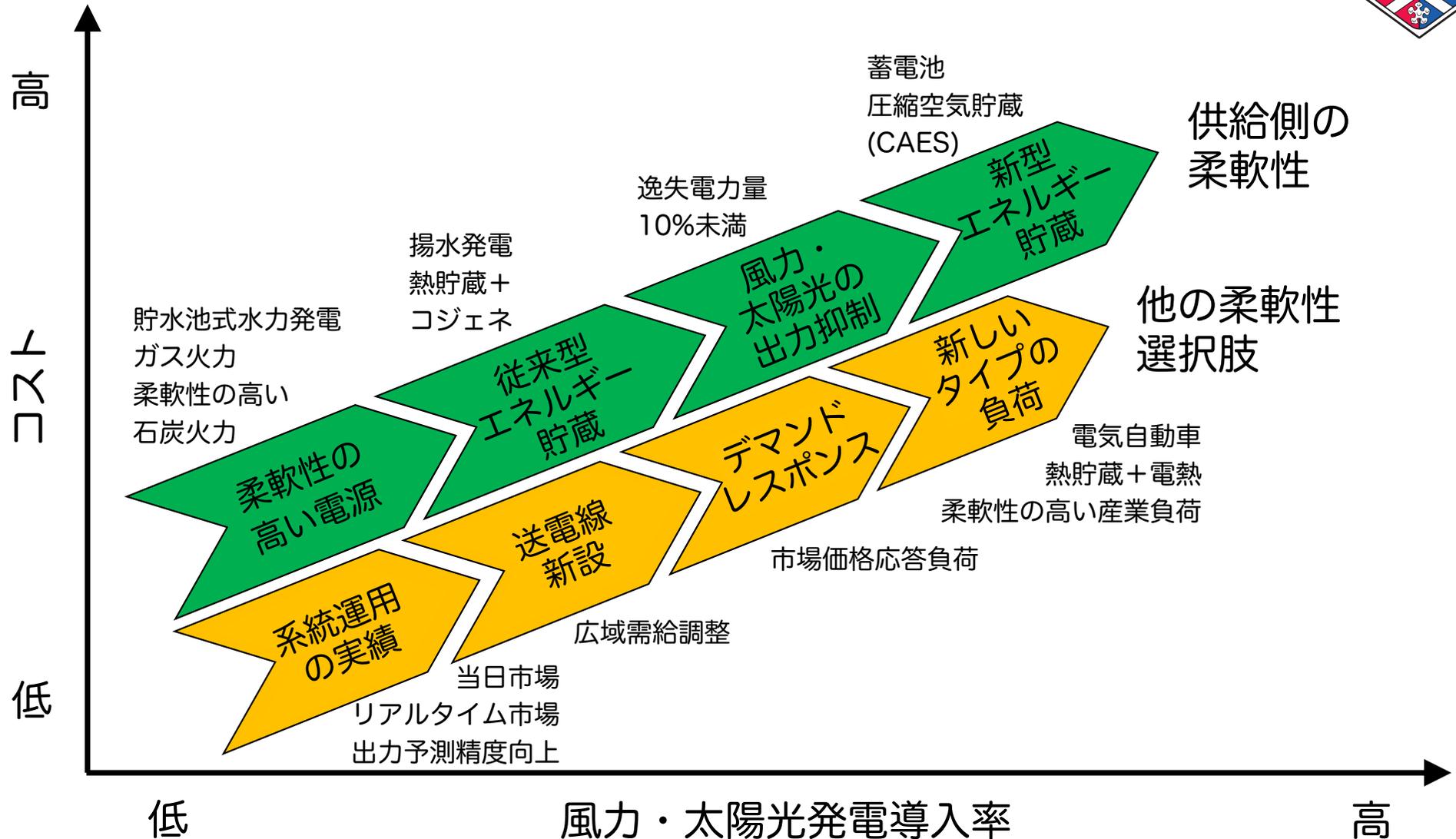
ストラスクライド大学 アカデミックビジター
九州大学 洋上風力研究教育センター 客員教授
環境エネルギー政策研究所 主任研究員

安田 陽





柔軟性供給の優先順位





統合コストについて



- システム統合コストという考え方は、用いられている方法に対して完全な合意に至らず、その有用性は失われてしまった (p.15)
- 従来は、風力発電のいわゆる統合コストを試算するのが一般的だった。いずれの方式も重大な欠点があることがわかっている (p.73)
- 政策立案者やその他の利害関係者は、発電コスト (LCOE) にシステム統合コストを加えようとするのではなく、異なるシナリオについて電力システム全体のコストと便益を評価することが望ましい。(p.73)

Task53 (風力発電の経済性)

項目	内容
目的	高い普及率下での未来における風力エネルギーの設計，運用等の傾向を予測し，コストと価値を含む風力エネルギーの経済的提供への影響を理解する
概要	
参加者 (敬称略) ○：主担当者	○菊地由佳 (東京大学)， 木村啓二 (大阪産業大学)
スケジュール	2022年～2025年の4年間
ワークパッケージ (WP)	WP1：設計・管理の技術調査 WP2：技術革新の経済影響 WP3：不確実性とリスクの影響 WP4：経済性評価の在り方 WP5：系統と水素 WP6：サプライチェーン
活動状況	・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？ 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。
課題	・エンジニアリングコストモデルを更新し，新しい技術によるコスト低減効果を評価する予定 ・国内外の入札等に関する結果を随時共有し，欧州での議論の情報収集を行うとともに，国内の分析に反映していく。
主な成果	・CfD制度が補助金というよりもリスクマネジメントとしての効用を持つことを論じた論文を出版(2023.12)
日本の取り組みと展開	・エンジニアリングモデルを用いて技術革新によるコスト低減量の評価手法を構築した。他国への展開・最新技術によるコスト低減を分析する。

各WPの実施内容

WP	題目と内容	担当者
WP1	“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？”	NREL (USA)
	専門家へのインタビュー（Expert elicitation）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。	
WP2	“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？”	UTokyo (JPN)
	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。	
WP3	“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？”	NREL (USA)
	現在進んでいる金融コストにたいする専門家への調査の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。	
WP4	“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？”	NREL (USA)
	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。	
WP5	“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？”	EA (DNK)
	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。	
WP6	“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？”	JRC (EU)
	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、その地域で作り出される価値について評価する。	

WP2: エンジニアリングモデルを用いたコスト低減

菊地由佳, 石原孟, 製造と施工方法を考慮したスパー型浮体式洋上洋上風力発電所の建設費評価, 日本風力エネルギー学会論文集, 2024

スパー型浮体施工の
従来手法と提案手法

Table 3 Description of conventional and advanced technologies

	Conventional	Advanced
Floater	Cylinder ²⁷⁾ 	Flat panel ²⁰⁾ 
Mooring line	Steel ²⁴⁾ 	Hybrid ²⁸⁾ 
Wind turbine Installation	Floating-to-floating ²⁹⁾ 	Floating-to-fixed ³⁰⁾ 
Mooring line installation	Barge type vessel ³¹⁾ 	AHTS ³²⁾ 

エンジニアリングモデルを用いた
提案手法による建設コストの低減量評価

Table 15 Comparison of CAPEX between baseline and advanced models (10,000JPY /kW)

Item	Baseline	Advanced	Reduction rate (%)
DEVEX	2.3	2.3	-
Turbine	13.9	13.9	-
BOP			
Floater	13.4	11.4	15
Mooring and anchor	6.8	4.3	37
PTS	3.1	3.1	-
Installation			
Turbine	6.0	3.1	48
Mooring and anchor	2.5	2.1	16
Floater	1.1	1.1	-
PTS	5.3	5.3	-
Port	0.1	0.1	-
Others	6.0	4.7	22
Total	60.6	51.5	15

WP2: エンジニアリングモデルを用いたコスト低減

F. D. McAuliffe et al., Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms, Applied Energy, 2024.

Hywindプロジェクトによる シミュレーションの妥当性の検証

Table 6
Validation case study - CAPEX.

	Installation model results	Published Hywind data
Dry CAPEX ¹	€109 m	
Anchor installation	€4 m	
Turbine assembly, towing & hook-up	€8.6 m	
Cabling	€12 m	Breakdown unavailable
Additional installation costs	€52 m	
Project management, construction insurance & contingency	€19 m	
Total installation costs	€95.6 m	
Total CAPEX	€204.6 m	€200 m

¹ Includes development and asset costs on and offshore.

Table 7
Validation case study – installation duration.

Installation Activity	Simulated	Published data
Anchors (3 per turbine = 15)	42 days	~42 days
Turbines (5)	72 days	~70 days
Inter-array cabling	26 days	~70 days
Export cabling	47 days	
Total duration	187 days	182 days

2035年運開予定の12MW風車83基の 約1GWの発電所でのケーススタディ

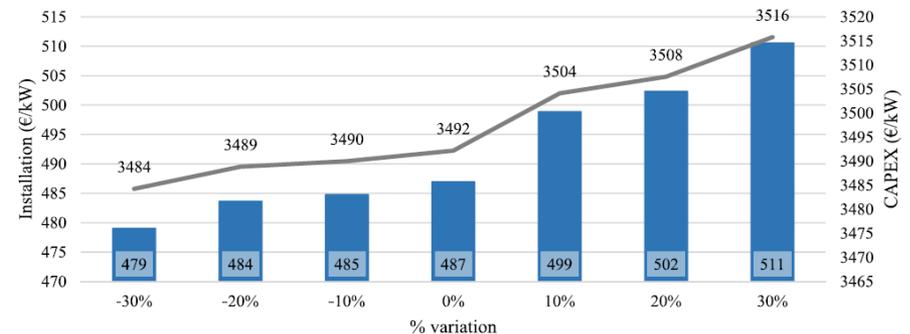
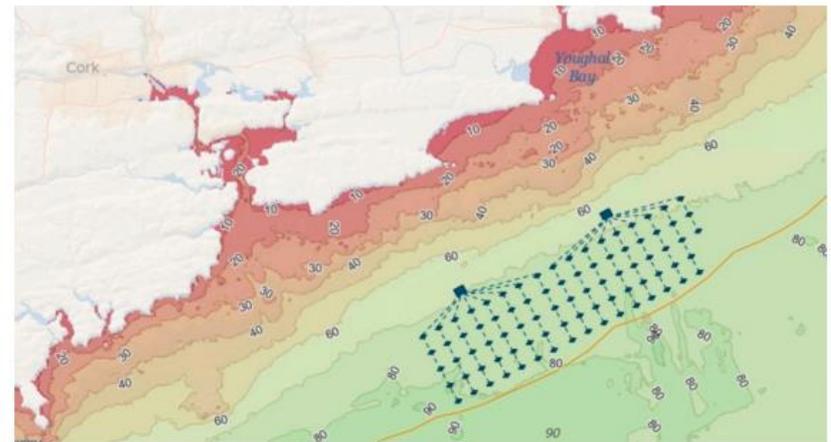


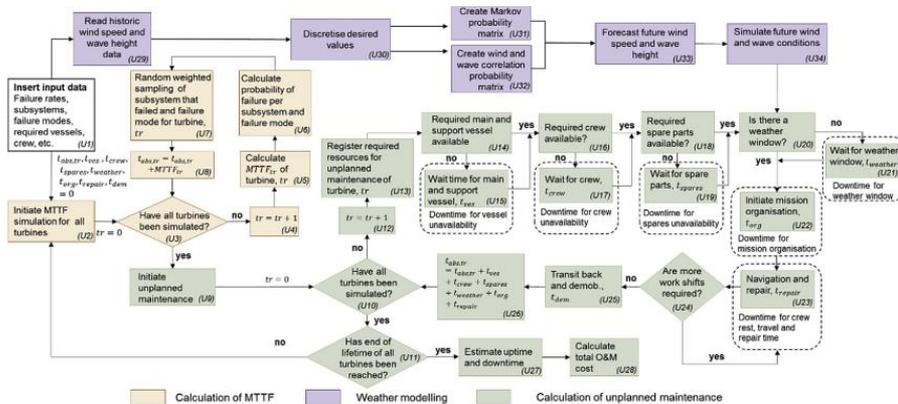
Fig. 5. Impact of cable installation durations on CAPEX and installation costs (€/kW).

IEA Task49 との連携

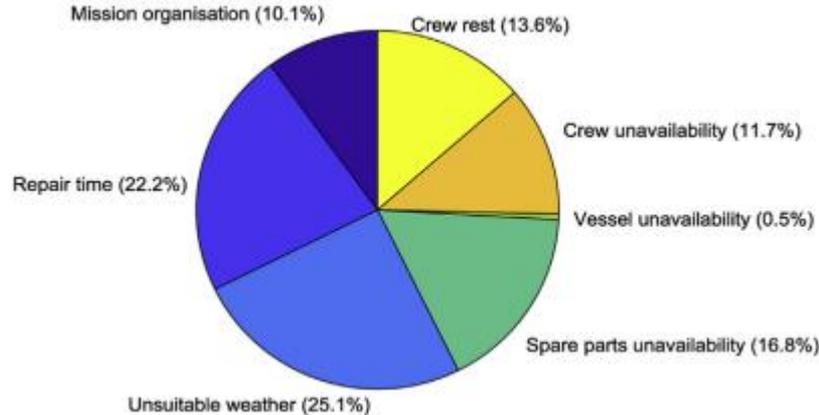
WP3: 不確実性とリスクの影響

A. Ioannou et al., Informing parametric risk control policies for operational uncertainties of offshore wind energy assets, Ocean Engineering, 2019.

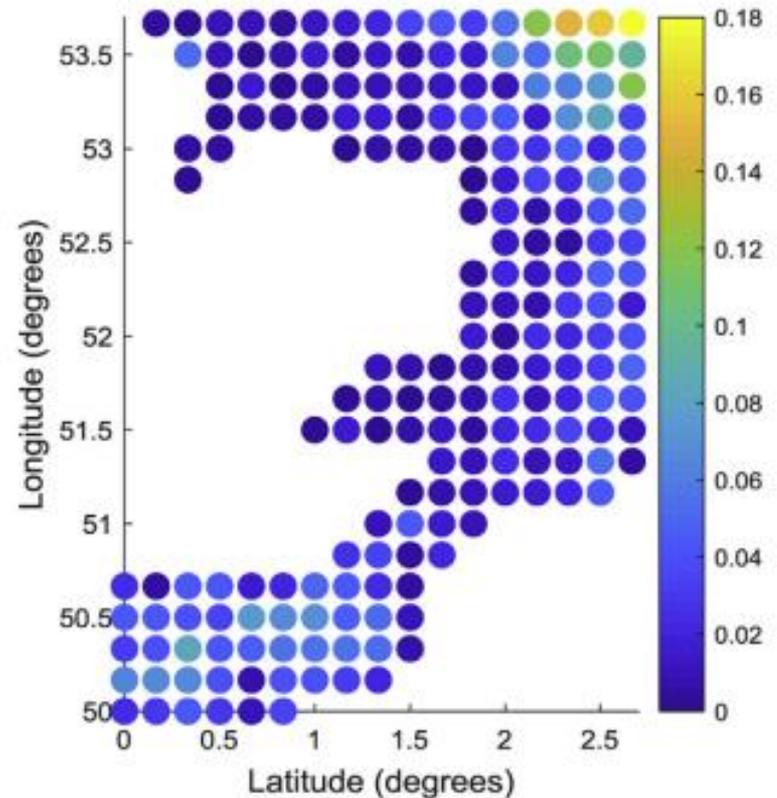
事後保全・定期点検のO&Mモデル



ダウンタイムの予測値



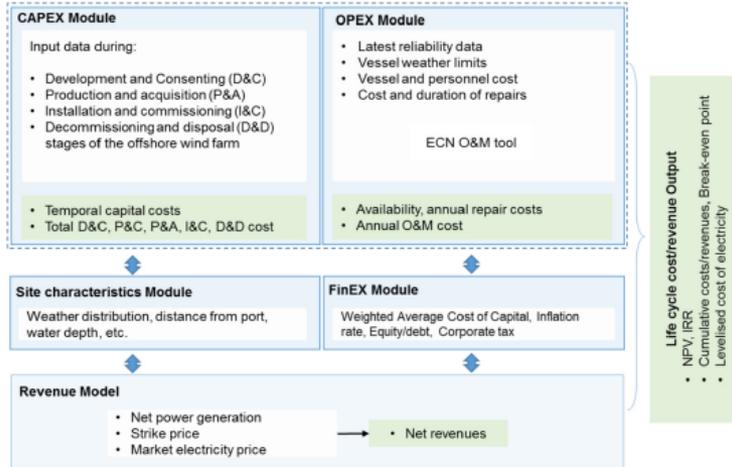
イギリスの南東の海域でのケーススタディ
45GWhを超えて発電ロスする超過確率



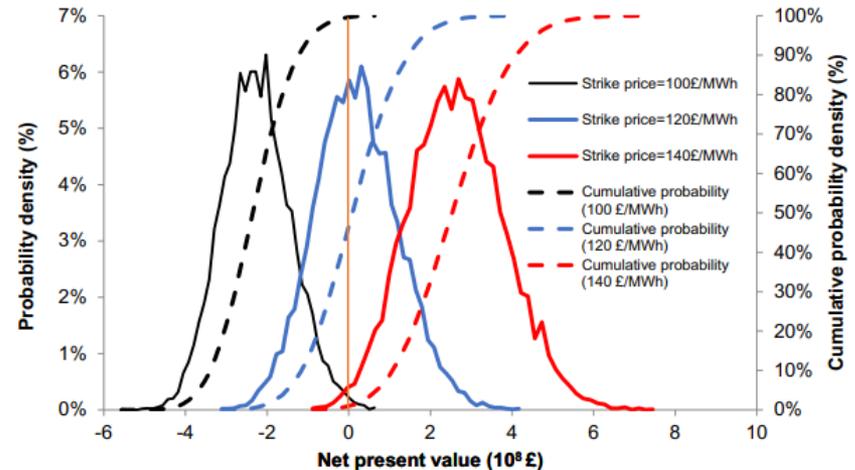
WP3: 不確実性とリスクの影響

A. Ioannou et al., Stochastic financial appraisal of offshore wind farms, Renewable Energy, 2020.

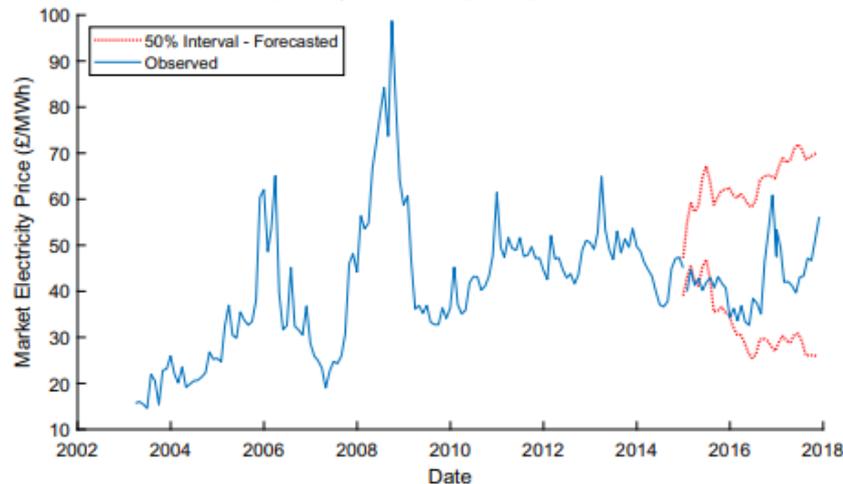
提案エンジニアリングモデル



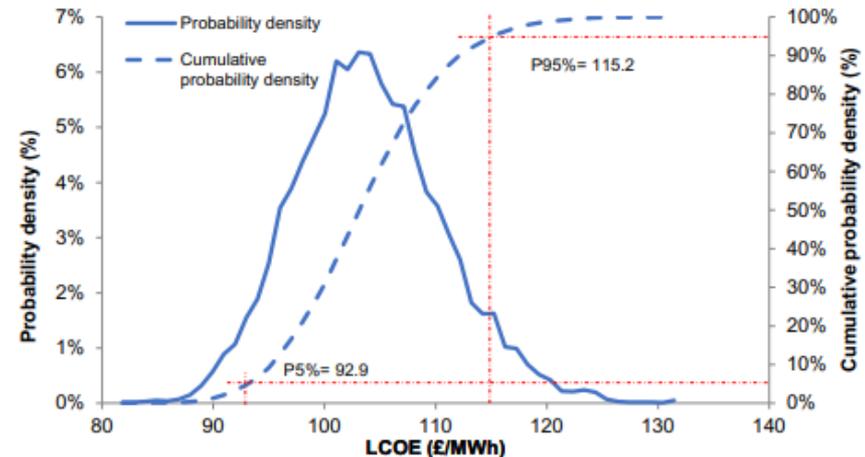
異なる基準価格でのNPV



電力価格の予測値の検証



LCOEの不確かさ



WP5: 系統と水素

- BALMOREモデルを用いて、水素の導入が風力発電と水素の価格に及ぼす影響を評価予定

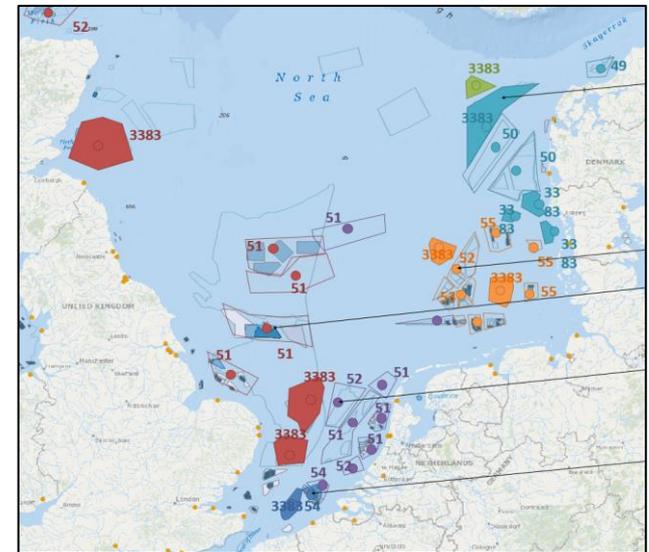
分析例:

- Case I: 100%を電力として送電
- Case II: 水素と電力に半分ずつに分けて送電
- Case III: 100%を水素として送電
- Case IV: 水素の最適な配分を評価するケース

DK, NL – 4 GW offshore wind in 2035, 10 GW in 2050

DE, GB – 6 GW offshore wind in 2035, 12 GW in 2050

BE – 6 GW in 2035



[論点]

風力発電の市場価値の持続可能性

大阪産業大学経済学部

木村 啓二

風力発電の発電コストは安くなった が . . .

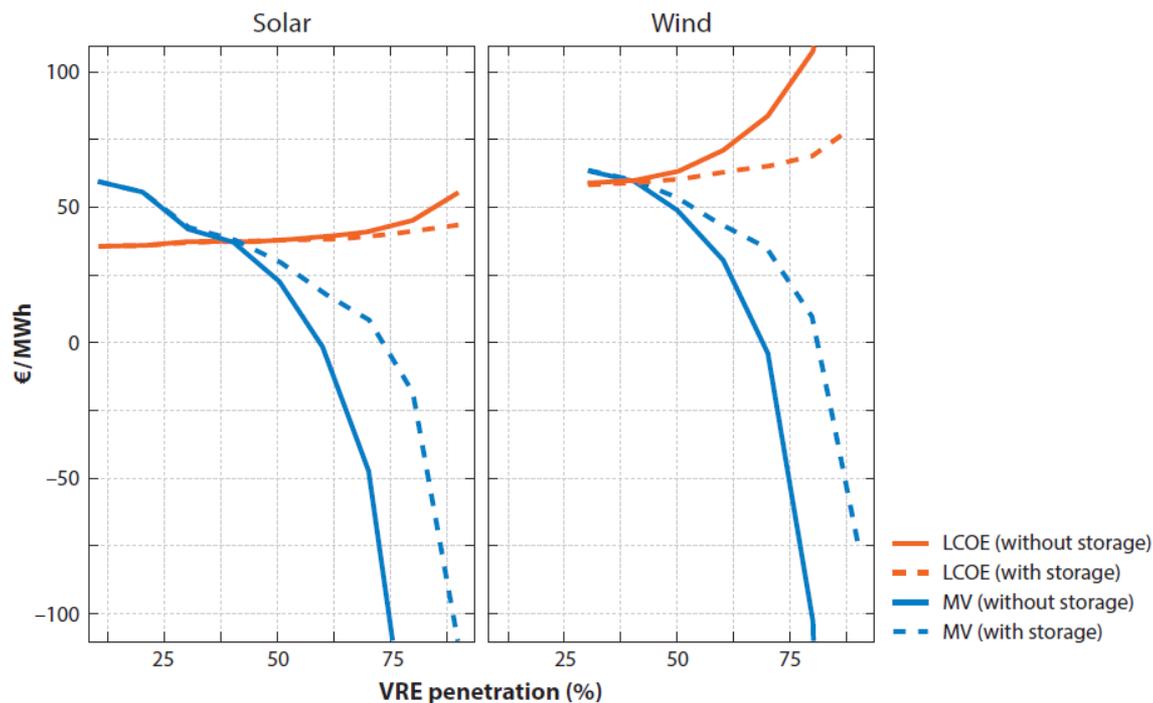
• 時間との勝負

- エネルギー需給構造を短期間(30年足らず)で大転換する必要
- そのためには、早急に再エネや省エネに対する投資を大幅に増やす必要がある

• 売電収益の持続性の問題：再エネの共食い現象

- 自然変動：需要に関係なく発電量が増減する
- VRE増加による供給過多が長時間で発生
 - 売電収入が減少する
 - 出力抑制の増加
- いくら安価でも収入も少ないなら投資が減速

共食い効果の定量分析



MV:市場での売電収入

LCOE:発電コスト

→MV>LCOEで投資可能

一定割合を超えると

- ・ネガティブ価格・抑制が頻発
- ・MVが急速に減少
- ・蓄電池を入れることで一定改善するも、本質的解決にはならない。

Source: López, P. J. and W. Schill, (2021), The Economics of Variable Renewable Energy and Electricity Storage

CfDの意味：Task53 の研究成果の1つ

- 世界の50%の洋上風力発電の買取制度として利用
- 風力は資本集約型であり、変動が激しいkWh市場での事業にはリスクが高い。（共食い効果も懸念）
- CfDは風力発電の電気に固定の収入を約束し、価格変動リスクをヘッジすることができる。この場合CfDの価格水準が卸電力価格より低くても（補助金ゼロ）でも有効性がある。
- 他のヘッジ手法（先物市場）は期間が短く長期性はない。

nature energy

Perspective

<https://doi.org/10.1038/s41560-023-01401-w>

The enduring role of contracts for difference in risk management and market creation for renewables

Received: 21 February 2023

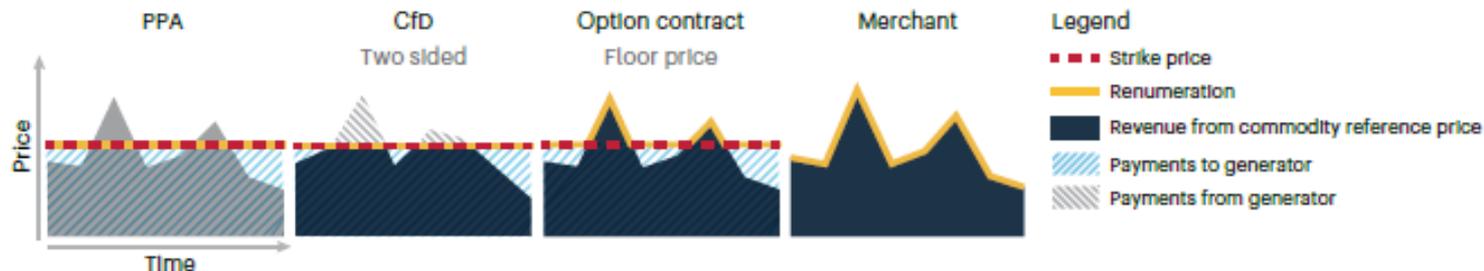
Accepted: 11 October 2023

Published online: 05 December 2023

[Check for updates](#)

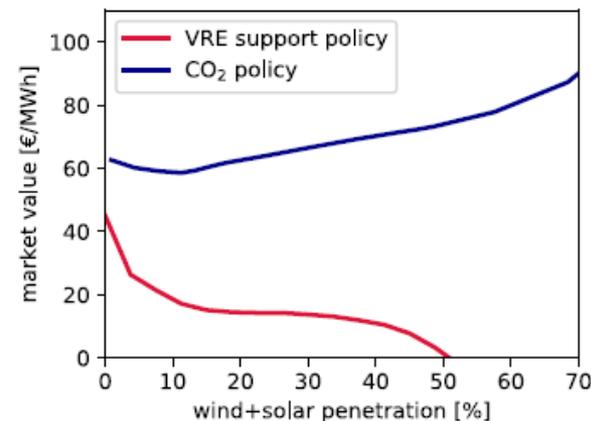
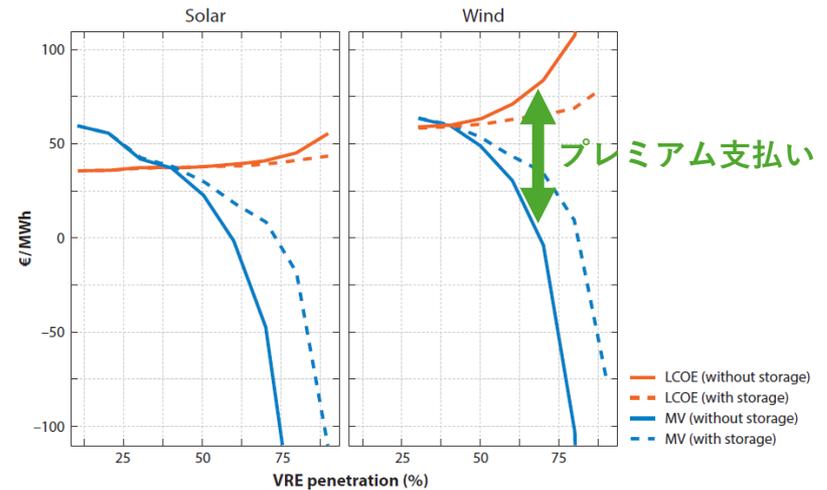
Philipp Beiter^{1,2}, Jérôme Guillet³, Malte Jansen³, Elizabeth Wilson^{4,5} & Lena Kitzing³

Governments procure renewables through a variety of mechanisms. Contracts for difference (CfDs) have been used for more than 50% of the global offshore wind supply. The payments awarded through CfDs are sometimes labelled subsidies, suggesting that they support uneconomic activity. Here, we argue that the primary role of CfDs is rather risk management by creating a market for electricity supply at stable long-term prices. Similar to its use in other sectors of the economy, this contract type transforms a variable to a fixed price to reallocate volatility risks. Such long-term contracts are often necessary for renewables financing due to limited hedging options in existing markets. Our perspective could imply a shift in perception towards CfDs as a fundamental and lasting market feature. We hope to stimulate a timely discussion about the impact of greater CfD diffusion on electricity market mechanisms, risk allocation and the potential for combining fragmented streams of energy finance, market



CfDの限界：市場への影響

- 発電事業者の収益を確保するが、共食い効果に対処しなければ、社会的に多大なプレミアム支払いにつながるのではないかと懸念されている。（市場のゆがみを増大させる結果になり、消費者負担が増加する）
- Brown & Reichenberg (2021)
 - 炭素価格がその一つであることを示している（右図）
 - 送電網や蓄電池などの柔軟性が重要な役割を果たす。
- VREのMVを維持して投資の持続可能性を高めつつ、市場をゆがめない政策が必要となっている。



Source: Brown & Reichenberg (2021) “Decreasing market value of variable renewables can be avoided by policy action”, Energy Economics 100.