

+ 分散型電力供給システムのあり方に関する研究会

2014年4月24日
@東京大学

再生可能エネルギーの大量導入のための電力系統の設計と運用

関西大学 システム理工学部 准教授 安田 陽

+ 自己紹介 (つづき)

3

■ サイドワーク/ライフワーク (翻訳)

- トワイデル・ガウディオージ: 「洋上風力発電」, 鹿島出版会, 2011 [共訳]
- 国際太陽エネルギー協会: 「風力エネルギー・ポケットレファレンス」, 2011 [共訳]
- 欧州風力エネルギー協会: 「風力発電の系統連系 -欧州の最前線-」, 2012 [共訳]
- 国際エネルギー機関(IEA) 風力実施協定第25分科会: 「風力発電が大量導入された電力系統の設計と運用」, 2012 [共訳]
- 気候変動に関する政府間パネル(IPCC): 「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」, 2013 [共訳]
- ファン・ヒューレ: 「風力発電の市場統合と系統連系」, 2013
- アッカーマン: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, 2013

+ 自己紹介

2

■ 普段の仕事

- 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科 准教授
- 主な担当科目: 電力システム工学, エネルギー工学
- 専門分野: 風力発電の耐雷設計, 系統連系問題

■ 外のお仕事 (社会貢献)

- 日本風力エネルギー学会 理事
- 電気学会 風力発電システムの雷リスクマネジメント技術調査専門委員会 委員長
- Member of IEA Wind Task 25 (風力大量導入時の系統運用)
- Members of IEC/TC88/MT21 (風車電力品質), WG24 (風車耐雷設計) & WG27 (風車モデリング)
- Member of CIGRE C4.409 (風車耐雷設計)

+ 本講演の内容

4

1. はじめに

- 再生導入率の国際比較

2. 風力発電にまつわる誤解と神話

- 風力発電は風まかせ?
- 風力は不安定? 蓄電池が必要?
- 北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力や太陽光を入れる余地はない?

3. 柔軟性評価チャート

4. 各国の事例 (資料編)

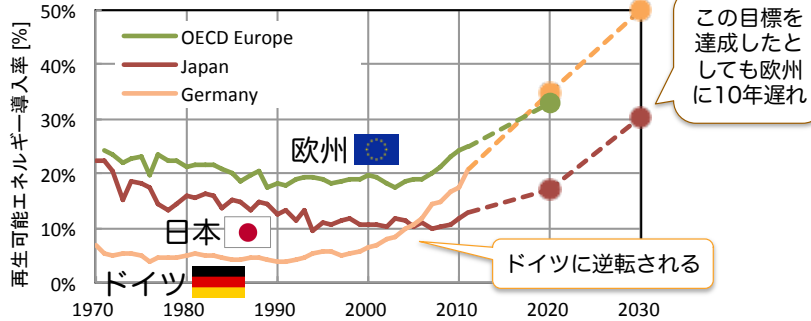
- デンマーク / アイルランド / ポルトガル / スペイン

5. おわりに

+ 再生可能エネルギー導入動向と政策目標 (欧州と日本の比較)

5

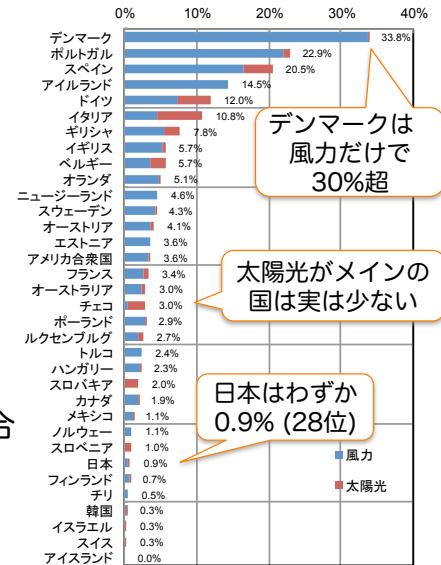
年間発電電力量における再生可能エネルギーの導入率



(データソース) IEA: Electricity Information 2013
EWEA: Pure Power III, 2011
REN21: Global Status Report, 2012
エネルギー・環境会議: 「革新的エネルギー・環境戦略」, 2012

+ OECD各国の風力発電および太陽光発電導入率 (2012年)

- 導入率: その国の全ての電源が1年間で発電した電力量 (kWh) に対する発電電力量 (kWh) の割合



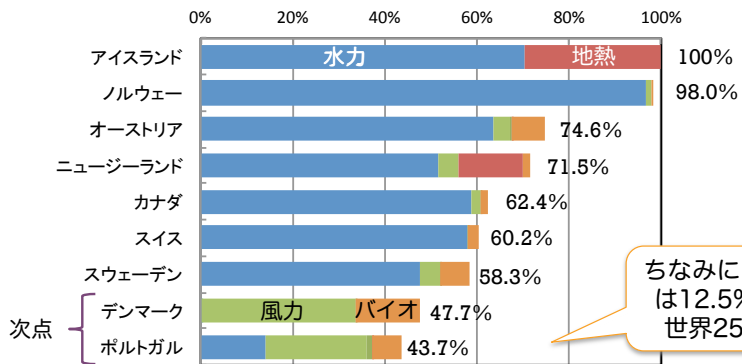
「日本は欧州と環境が違うから・・・」という理由では済まされない大きな乖離

(データソース) IEA: Electricity Information 2013 より筆者作成

+ 再生可能エネルギー導入率

6

- 再生可能エネルギー50%供給(但し電力)を実現している国は、2012年時点で7ヶ国。



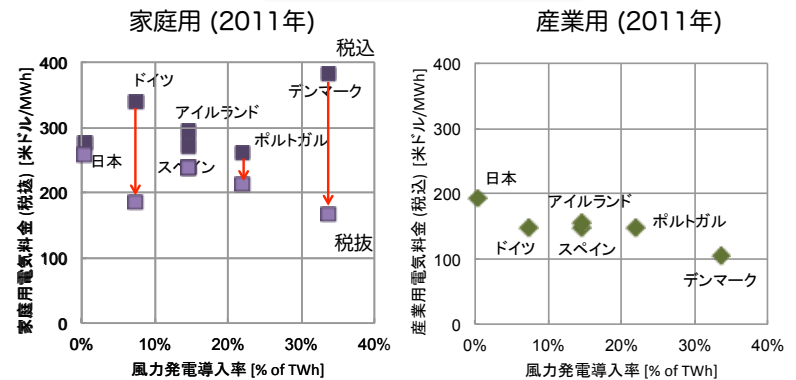
ちなみに日本は12.5%で世界25位

(データソース) IEA: Electricity Information 2013より筆者作成

+ 風力導入上位国の電力料金比較

8

風力が入ると電気代が上がる! ...という傾向は実は見られない



(出典) 安田: 風力エネルギー利用シンポジウム, 2013
(データソース) IEA: Electrical Information 2013 および Energy Prices & Taxes, 2013

+ 欧州の言説


9

- 「欧州の電力系統に連系できる風力発電の量を決めるのは、技術的・実務的制約よりも、むしろ経済的・法制的枠組みである。」
- 「風力発電は今日すでに、大規模電力系統では深刻な技術的・実務的問題が発生することなく電力需要の20%までを占めることができると一般に見なされている。」
- 「20%以上というさらに高い導入率のためには、電力系統および風力発電を受け入れるための運用方法における変革が必要である。」

(出典) EWEA: 「風力発電の系統連系 ～欧州の最前線～」, 2009

+ ここまでのまとめ

10

- 日本の再エネ導入は欧州の動向に比べ周回遅れ
 - 欧州は風力がメイン。日本は何故か太陽光。
 - 世界の潮流の中で異質で独自路線な日本。
- 
- 世界の情報が国民にきちんと伝わっているか？
 - データに基づかない感覚論が流布していないか？
 - 国民の中できちんと議論されているか？

+ 本講演の内容


11

1. はじめに
 - 再エネ導入率の国際比較
2. 風力発電にまつわる誤解と神話
 - 風力発電は風まかせ？
 - 風力は不安定？ 蓄電池が必要？
 - 北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力や太陽光を入れる余地はない？
3. 柔軟性評価チャート
4. 各国の事例 (資料編)
 - デンマーク / アイルランド / ポルトガル / スペイン
5. おわりに

+ 系統連系にまつわる誤解と神話 1

12

■ 「風力発電は風まかせ」？

- 
- A: 風力発電は天候依存の変動電源ではあるが、広域で集合化すれば、電力系統に大量導入が可能。
 - そもそも**負荷需要**自体、天候に左右される。負荷変動に対する**予測**や運用は昔から確立されている。
 - **変動電源の予測**や運用は、欧米で実用化が進み既に実際の系統運用に組み込まれている。
 - 日本の現在の電力系統の運用方法では、そもそも変動電源を受け入れる体制がほとんどできていない。

+ 系統連系のキーワード

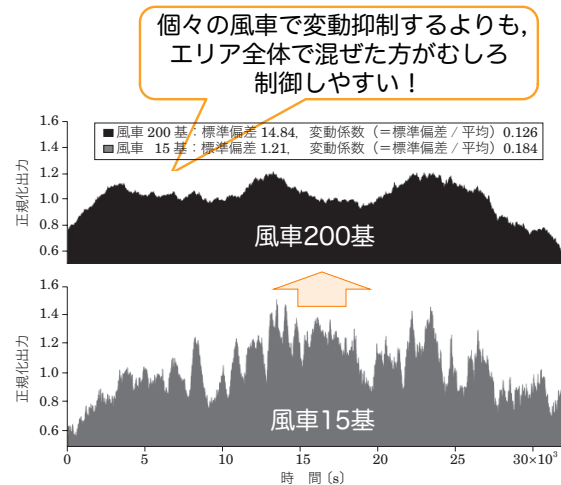
13

- 「変動電源」 variable generation: VR
 - 自然エネルギーなどを由来とする変動する電源。
 - 従来も変動電源はあった。(流れ込み式水力)
 - 変動電源を如何に系統運用に組み込むかが現在の欧米の系統運用者の責務
- 「集合化」 aggregation
 - 変動電源の変動性は系統に混ぜて平滑化する。
 - 広域で考えれば変動性はより少なくなる。
 - 実は負荷変動も同じ考え。

言葉がないのは
思想がないのと同じ。

+ 集合化 aggregation のコンセプト

14



変動すれば直ちにアウト！ではなく、問題はその変動が管理できる範囲内にあるかどうか。

(出典) アッカーマン: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, 2013

+ 風力発電にまつわる誤解と神話 2

15

■ 「風力は不安定」？ 「蓄電池が必要」？

- 「不安定」という観点では、原子力や火力の不測の停止も当然考えられる。
- それらを全て考慮した電力系統全体の「系統安定度」「系統信頼度」という指標で考えるのが一般的。
- 系統安定度・信頼度を低下させることなく、風力を大量に導入できることが欧米で実証されている。
- 電源側に専用蓄電池を導入するのは技術的にも経済的にも非合理。欧米では系統側・負荷側に設置し、リアルタイム市場などで利ざやを稼ぐ。

+ 風力発電にまつわる誤解と神話 2

16

■ 「風力は不安定」？ 「蓄電池が必要」？

(前ページからのつづき)

- 個別の風車出力を見ると、確かに変動は多い。
- 欧米では、広域出力を「集合化 (aggregation)」して、系統全体でその変動を吸収する方法が取られている。
- 実は、負荷変動の平滑化も同じ方法。
- 日本では、なぜか個々の風力に変動抑制が求められる。(社会コスト全体としては最適か？)

+ 風力発電にまつわる誤解と神話3

17

- 「北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力を入れる余地がない」？



- 欧州
 - デンマーク、ドイツは連系線を豊富に持つ。
 - アイルランド、スペイン、ポルトガルなど、連系線が少ないところでも風力は大量導入されている。
- 日本
 - 北海道や東北に連系線はないのか？
 - 連系線は本当に「足りない」のか？

+ 風力・太陽光発電の系統連系問題

18

- よくある誤解と神話
 - 「風力・太陽光は変動するので系統に悪影響」
 - 「(特に北海道と東北は)電力の安定供給のため、これ以上風力・太陽光を入れる余地がない」
 - 「日本は会社間連系線の容量が少ない」
- 国際的レベルで考えると・・・
 - 連系線がないと変動電源(風力+太陽光)が大量導入できないというのは「神話」にすぎない。
 - 日本に連系線容量が少ないというのも「神話」。
 - 現状の連系線容量でも大量導入は可能。
 - 技術的問題ではなく、ルール整備など制度的問題。

+ 3つの導入率の定義

19

■ エネルギー(発電電力量)導入率

$$\text{導入率} = \frac{\text{再エネ発電電力量 [kWh]}}{\text{年間発電電力量 [kWh]}}$$

■ 設備容量導入率

$$\text{導入率} = \frac{\text{再エネ設備容量 [kW]}}{\text{年間ピーク負荷 [kW]}}$$

■ 軽負荷時導入率

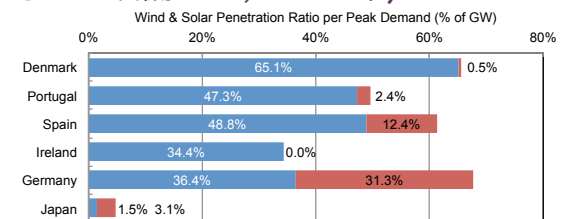
$$\text{導入率} = \frac{\text{再エネ設備容量 [kW]}}{\text{年間最低負荷 + 連系線容量 [kW]}}$$

(出典) アッカーマン編著:「風力発電導入のための電力系統工学」第17章, オーム社, 2013

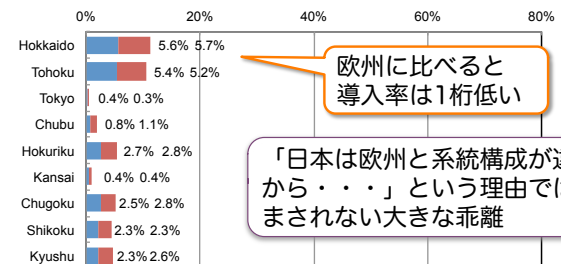
+ 風力+太陽光発電設備容量導入率 (ピークに対する設備容量, 2011年)

20

欧州
主要国



日本
各電力
エリア



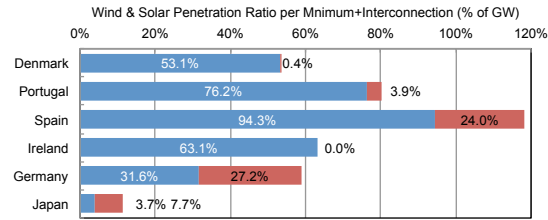
欧州に比べると
導入率は1桁低い

「日本は欧州と系統構成が違うから・・・」という理由では済まされない大きな乖離

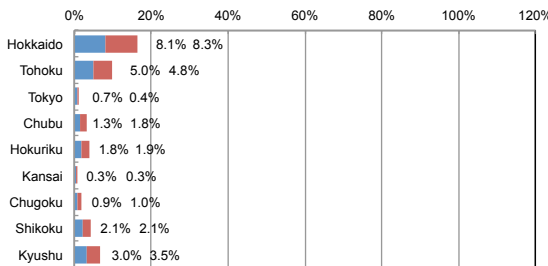
風力+太陽光発電軽負荷時導入率 (軽負荷+連系線に対する設備容量)

21

欧州
主要国

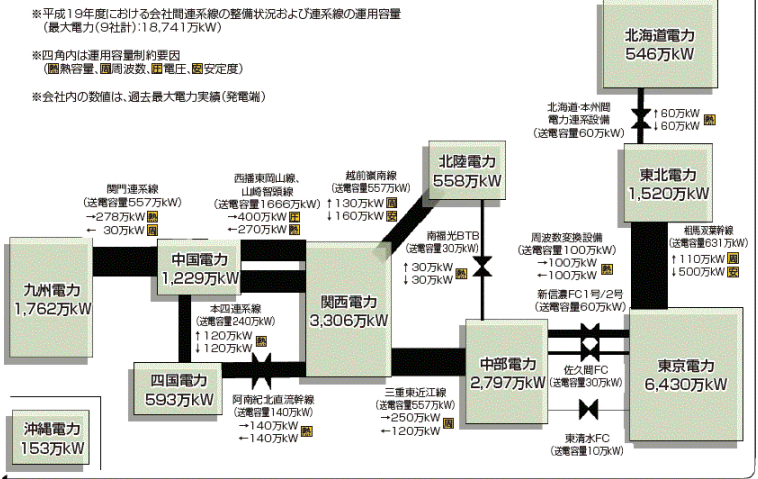


日本
各電力
エリア



日本の会社間連系線

23

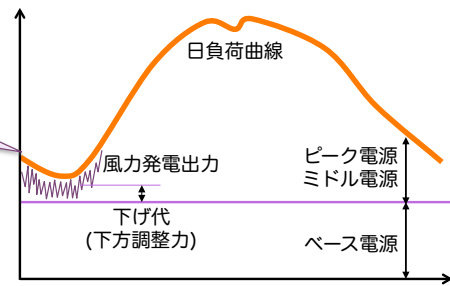


(出典) 資源エネルギー庁: エネルギー白書2011

我が国における 風力発電の「連系可能量」と 「下げ代不足問題」の考え方

22

軽負荷時の下方調整力の不足を理由として風力の導入量を制限

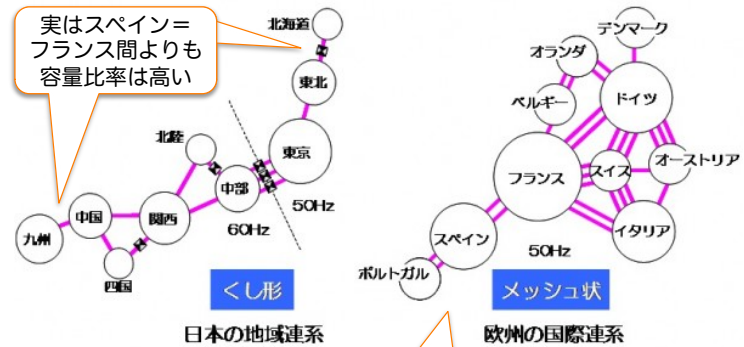


欧州および米国では、揚水発電、コジェネ、連系線を用いて下方予備力を準備。石炭火力・原子力の出力抑制も利用。

スペインとドイツでは再エネの接続義務がある(欧州他国も事実上接続申請却下は難しい)

日本と欧州の電力系統比較 (恣意的に誇張された例)

24



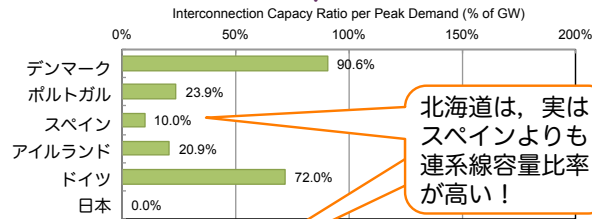
意図的に誇張された誤解を生み易い解釈

(出典) <http://www.gepr.org/ja/contents/20120604-02/>

+ 連系線設備容量比率 (ピーク負荷に対する設備容量)

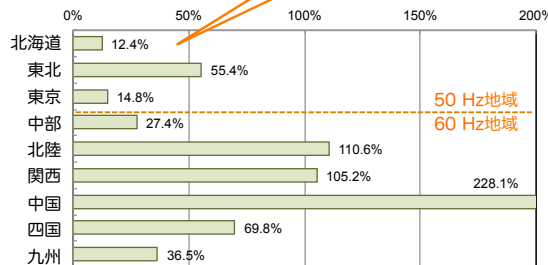
25

欧州
主要国



北海道は、実は
スペインよりも
連系線容量比率
が高い！

日本
各電力
エリア

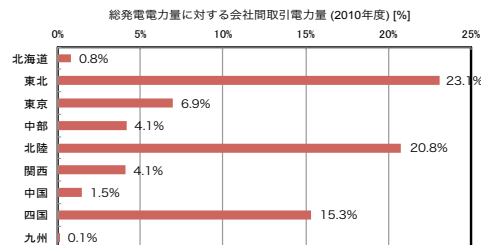


50 Hz地域
60 Hz地域

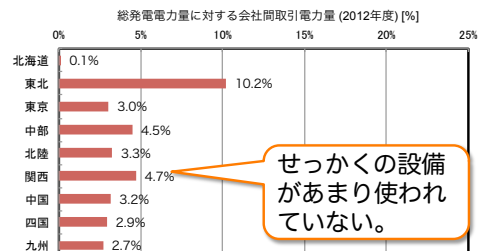
+ 我が国の連系線利用状況

26

2010年
(原発事故前)



2012年
(原発事故後)



せっかくの設備
があまり使われ
ていない。

(データソース)
資源エネルギー庁:
電力調査統計

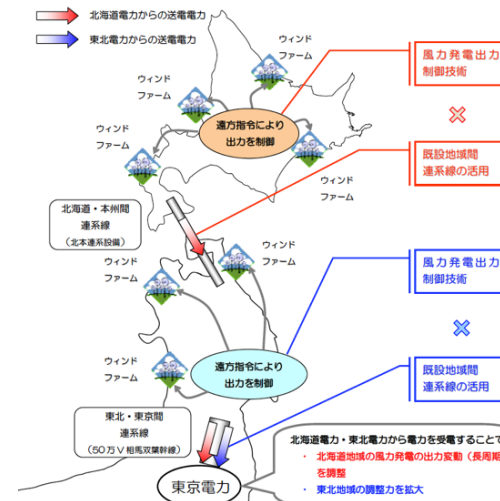
+ 風力・太陽光発電の系統連系問題

27

- 北海道から東京への送電は・・・、
 - 技術的には既存設備で十分可能。
 - ただし、現在では制度的に難しい。
 - 現時点では変動電源(再生可能エネルギー電源)を優先的に託送・融通するルールがない。
 - 緊急時の融通や計画的な託送しか許可されていない。
 - 現在の運用では十分な電力量を送ることができない。
 - 経済産業省や電力利用協議会(ESCJ)はこのルールを変更することを現在検討中。
 - 北海道/東北/東京電力三者で広域運用の実証試験中。
 - 実証試験で確かめられれば、爆発的に導入が進む可能性大。

+ 北海道/東北/東京電力の実証試験

28



(出典) 北海道電力HP, http://www.hepco.co.jp/info/2011/1187930_1445.html

+ 本講演の内容

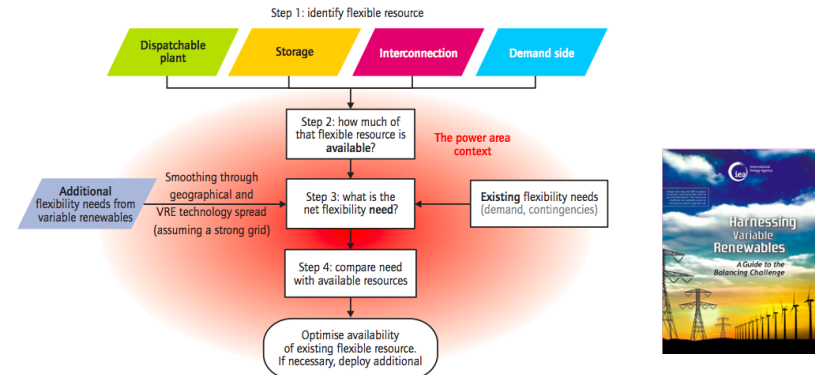
29

1. はじめに
 - 再エネ導入率の国際比較
2. 風力発電にまつわる誤解と神話
 - 風力発電は風まかせ？
 - 風力は不安定？ 蓄電池が必要？
 - 北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力や太陽光を入れる余地はない？
3. 柔軟性評価チャート
4. 各国の事例 (資料編)
 - デンマーク / アイルランド / ポルトガル / スペイン
5. おわりに

+ 柔軟性

31

■ 国際エネルギー機関 (IEA) GIVAR プロジェクトによる定義と評価



(出典) IEA: Harnessing Variable Renewables, 2011

+ 再生可能エネルギー大量導入のための重要な指標

30

- 「柔軟性」 Flexibility
 - 系統の変動に対応し需給バランスを維持するための能力。
 - 具体的には、
 - 調整力のある電源
 - 貯水池式水力発電
 - コージェネレーション (コジェネ)
 - コンバインドサイクルガス発電 (CCGT)
 - エネルギー貯蔵装置 (揚水発電)
 - 連系線
 - デマンドレスポンス

世界で活発に議論
(日本では殆んどなし)

風力を調整するのは
火力だけではない!

+ 柔軟性評価チャート

32

Flexibility Chart

- 文献
Yasuda et al.:
“Flexibility Chart”, Wind Integration Workshop 2013
- 2013年10月
ロンドンにて
発表

Flexibility Chart
Evaluation on diversity of flexibility in various areas

Yoh Yasuda Kansai University, Osaka, Japan	Emilio Gomez-Lazaro Univ. Castilla La Mancha, Spain	Nickie Mememelis Hydro Québec, Québec, Canada
Ale Rygg Ardal, Daniel Huertas Hernandez SINTEF, Trondheim, Norway	Hannele Heitinen, Juha Kivimäki VTT, Espoo, Finland	Michael Milligan National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA
Enrico Maria Carlini TERNIA RETE ITALIA, Rome, Italy	Frans von Hulle XPWind, Brussels, Belgium	Amteje Orbs Energinet.dk, Fredericia, Denmark
Ana Estanqueiro LNEG, Lisbon, Portugal	Junji Kondoh Tokyo Univ. of Science, Tokyo, Japan	Charles Smith Utility Variable Generation Integration Group, Southern Shores, NC, USA
Damian Flynn University College Dublin, Dublin, Ireland	Bernhard Lange Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology, Germany	Lennart Söder KTH, Stockholm, Sweden

Abstract— This paper evaluates various aspects of flexibility in power systems worldwide within the multi-country study framework of IEA Wind Task 25, including grid components and actions which have been favoured for enhancing flexibility in different areas/countries/regions, and how TSOs/NOs utilities intend to manage variable generation in their operating strategies. One methodology to evaluate the diversity of flexibility sources is a “flexibility chart”, which can illustrate several flexibility parameters (e.g. hydro, CCGT, CHP, interconnection) in a polygonal radar (spider) chart. Agency’s (IEA’s) GIVAR (Grid Integration of Variable Renewables) Project proposed the Flexibility Assessment (FAST) Method in their report in 2011 [1]. In [2], the simplified index Maximum Share of wind power was evaluated as an indication of how challenging it is to integrate a larger share of wind power in a certain system. Also, a scenario to measure flexibility was designed [3]. These methods will be useful for quantitative estimation of flexibility in a targeted country/area. A proposed “Flexibility Chart” [4] is employed to visualize the dominant factors and compare the variety of solutions in different countries/areas. The chart was designed as an “at-a-glance” graph that clearly shows the difference of flexibility situations and provides an easy-to-



+ 本論文の背景

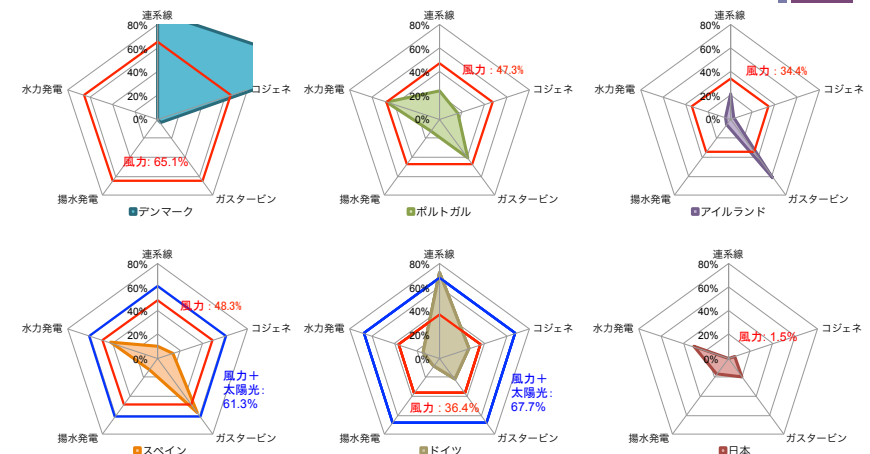


33

- IEA Wind Task25の枠組みによる国際比較研究
 - 国際エネルギー機関 風力実施協定 第25分科会 「風力発電大量導入時の系統運用と設計」
 - 日本からは、近藤、安田がエキスパートメンバーとして参加。日本窓口機関はNEDO, 産総研, JEMA
 - IEA RE division, IEA PVPS Task14などとも協調
- 「柔軟性評価チャート」 Flexibility Chart
 - 13ヶ国が参加して調査
 - 各国の入手可能な統計データから、各国/エリアが取り得る柔軟性のポテンシャルの傾向を図示

+ 欧州の柔軟性評価チャート

35

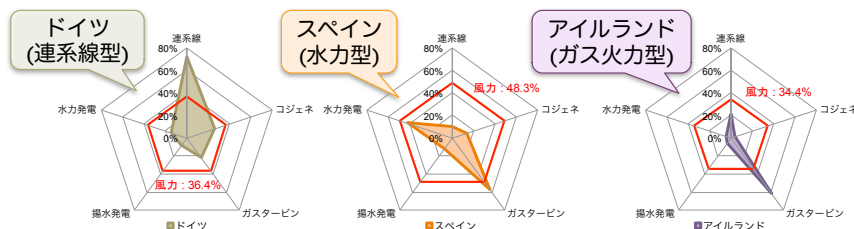


(出典) Yasuda et al.: "Flexibility Chart", Wind Integration Workshop 2013

+ 柔軟性評価チャート (2011年末設備容量)

34

- IEA Wind Task25 (風力発電大量導入時の系統運用と計画)の枠組みで13ヶ国が参加して調査
 - 各国の入手可能な統計データから、各国/エリアが取り得る柔軟性のポテンシャルの傾向を図示
 - 図の各軸は設備容量導入率 (% of kW)



(出典) [4] Yasuda et al.: "Flexibility Chart", Wind Integration Workshop 2013

+ 本講演の内容

36

- はじめに
 - 再エネ導入率の国際比較
- 風力発電にまつわる誤解と神話
 - 風力発電は風まかせ？
 - 風力は不安定？ 蓄電池が必要？
 - 北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力や太陽光を入れる余地はない？
- 柔軟性評価チャート
- 各国の事例 (資料編)
 - デンマーク / アイルランド / ポルトガル / スペイン
- おわりに

+ 各国の事例 (資料編)

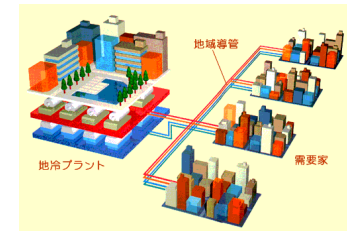
37

- デンマーク
 - 風力発電導入率 33.8% (2011年)
- ポルトガル
 - 同 22.9%
- スペイン
 - 同 20.5%
- アイルランド
 - 同 14.5%

+ コージェネレーション(CHP)

39

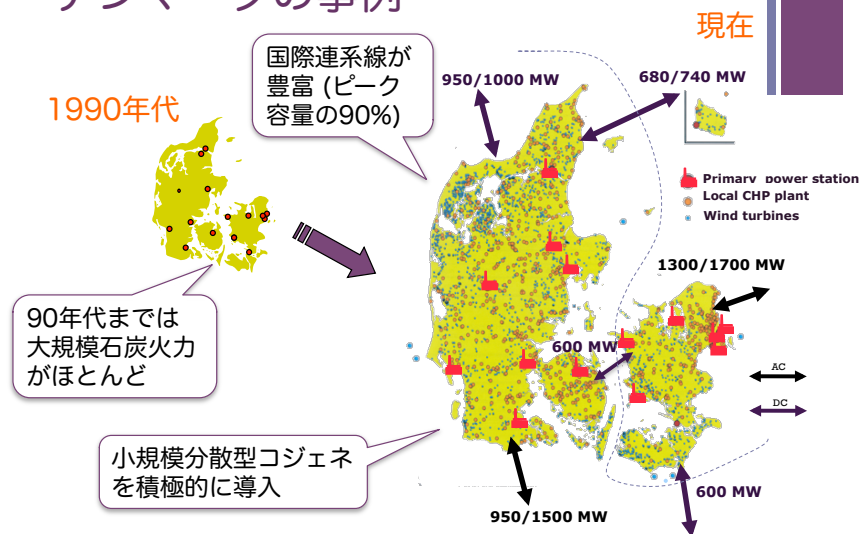
- 発電だけでなく熱供給も行う
 - 高効率 (発電の排熱を利用した熱供給のため)
 - 需要地に隣接 (熱は長距離輸送できないため)
 - 小規模分散型が多い (需要地に隣接しているため)
 - 熱をバッファとした柔軟性が供給可能
- デンマークでは将来コージェネも全てバイオ化 (2030年まで)
- 日本では熱供給に対するインセンティブや政策が希薄(?)



(出典) 日本熱供給事業協会HP <http://www.jdhc.or.jp/what/what02.html>

+ デンマークの事例

38



(出典) A. Orths: Wind Integration Workshop in Tokyo, 2012

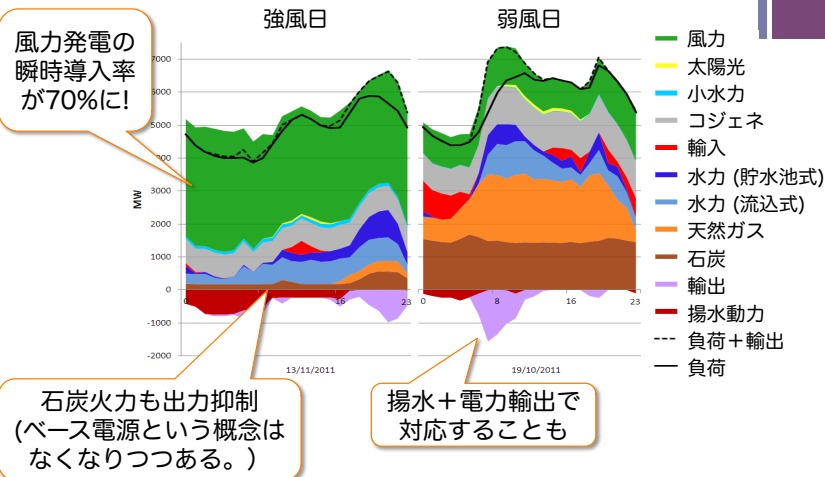
+ コージェネがなぜ柔軟性を持つのか?

40

- コージェネ (熱電併給) は分散型電源
 - 分散型電源は系統運用からみると厄介者。
 - 今どれくらい発電しているのかわからない。
 - 必要なときに働いてくれない。
 - いざというときに止めてくれない。
- ↓
- デンマークでは、コージェネに通信要件を課すことによりそれを解消。
 - 監視・制御機能を義務づけ (FIT認定条件)
 - 系統運用を支援する「柔軟性」のある電源に。

+ ポルトガルの事例 (2011年秋)

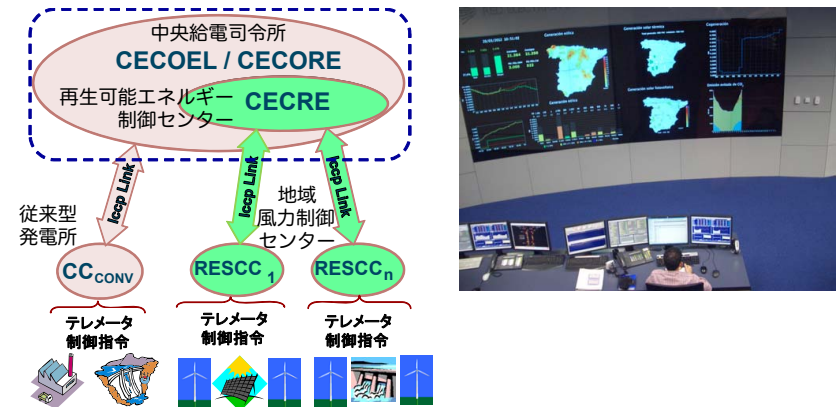
41



(出典) A. Estanqueiro: Wind Integration Workshop in Tokyo, 2012

+ 風力発電出力予測・制御技術 (スペインでの実用例)

43



小西: 日本風力発電協会誌, 2013年8月号, p.69-77

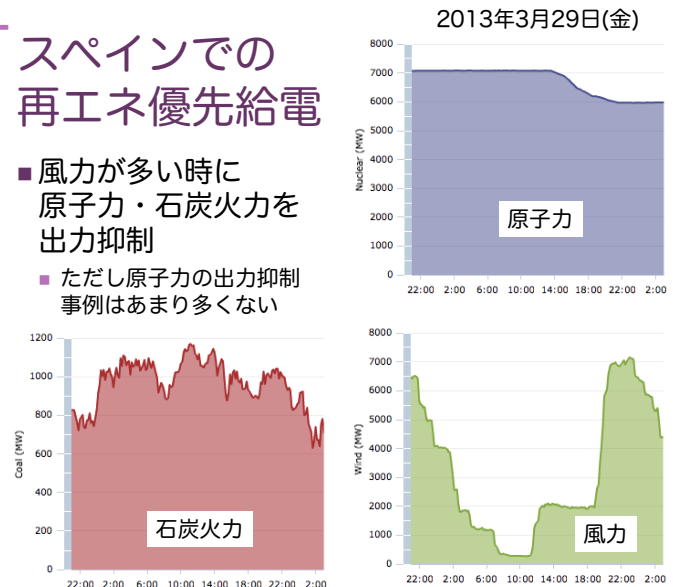
+ スペインの事例

42

- スペインでは中央給電司令所に再生可能エネルギー制御センターを世界に先駆け設置。
 - 全ての大規模風力+太陽光をリアルタイムで監視。
 - 今どれくらい発電しているのかわかる。予測精度向上。
 - いざというときに止められる (但し年間0.8%程度)。
- ↓
- スペインでは、変動電源に**通信要件**を課すことにより大量導入を可能に。
 - 監視・制御機能を義務づけ (スペイン王令)
 - 系統安定度を維持しながら大量導入を実現。

+ スペインでの 再エネ優先給電

- 風力が多い時に原子力・石炭火力を出力抑制
 - ただし原子力の出力抑制事例はあまり多くない



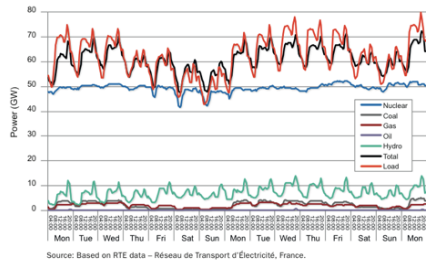
(出典) REE web page, <https://demanda.ree.es/demandaEng.html>

+ 原子力発電出力調整の例

45

- 欧州では再生可能エネルギーの「優先給電」が法的に義務づけられているため石炭火力・原子力も出力調整する。

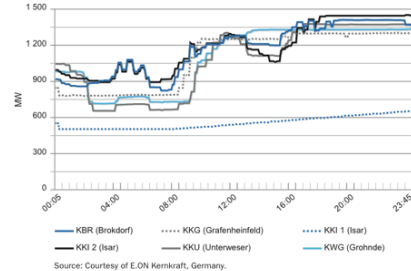
Figure 3.2: Example of the electricity generation in France during 2 weeks in November 2010



フランスの例

(出典) OECD Nuclear Energy Agency: "Nuclear and Renewables", 2012

Figure 3.4: Load following operations of E.On nuclear units in Germany

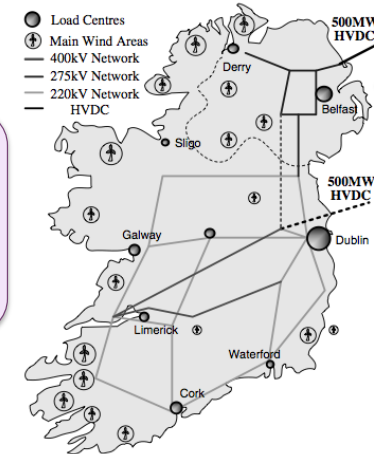


ドイツの例

+ アイルランド島の電力系統

47

Ireland and Northern Ireland Power System Current and Planned



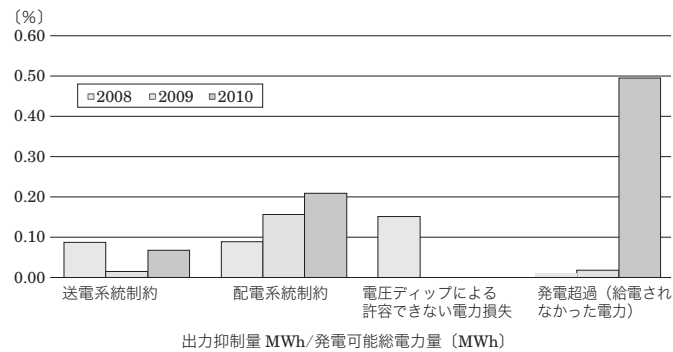
アイルランド島は北海道と、ほぼ同じ面積、ほぼ同じ人口、ほぼ同じ消費電力量、ほぼ同じ連系容量

アイルランドは国際連系線が少ない

それでも風力発電導入率は約15%。2020年までには40%を計画。

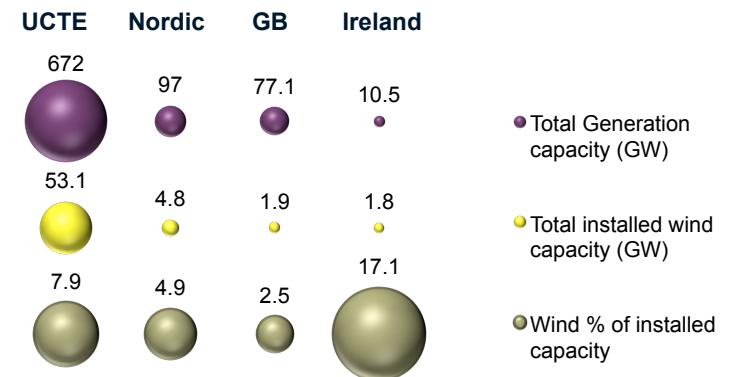
(出典) アッカーマン: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, 2013

+ スペインにおける風力発電の出力抑制実績



(出典) アッカーマン: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, 2013

Ireland: Very High Wind Penetration

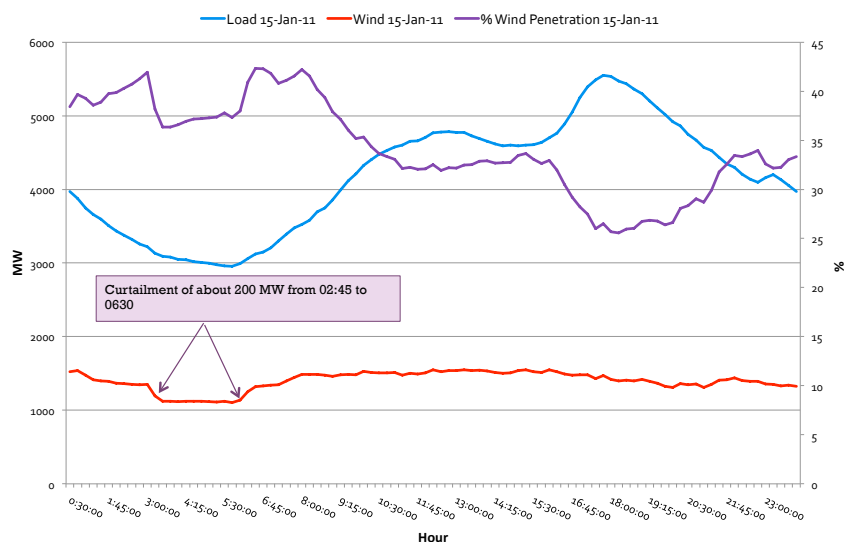


Figures for end 2008

Source: Global wind energy outlook 2008, EirGrid, UK National Grid, NORDEL, Eurelectric

(出典) M. O'Malley: Wind Integration Workshop in Tokyo, 2012

Ireland, Wind & Load – 15 Jan 2011



(出典) M. O'Malley: Wind Integration Workshop in Tokyo, 2012

51

+ 本講演の内容

1. はじめに
 - 再エネ導入率の国際比較
2. 風力発電にまつわる誤解と神話
 - 風力発電は風まかせ？
 - 風力は不安定？ 蓄電池が必要？
 - 北海道や東北はもう容量が一杯でこれ以上風力や太陽光を入れる余地はない？
3. 柔軟性評価チャート
4. 各国の事例 (資料編)
 - デンマーク / アイルランド / ポルトガル / スペイン
5. おわりに

52

+ まとめ

- **変動電源**を大量に電力系統に導入するには…
 - 系統の柔軟性を高めることが必要
- **柔軟性**をどのような手段で確保するか？
 - 連系線
 - 水力発電 / CCGT / コジェネ
 - 揚水発電
- 柔軟性の確保は多様性がある。
 - 日本も既存設備だけでも柔軟性のポテンシャルは十分高い
 - 連系線の活用：既存設備でも十分柔軟性を供給可能
 - 揚水発電の活用：市場インセンティブが課題
 - ディスパッチ可能なコジェネの導入促進
- 変動電源の導入の可否は制度上の問題。

+ 各国事例のまとめ

- **デンマーク**
 - 連系線+コジェネによる変動抑制
 - 導入率30%超を達成
- **ポルトガル**
 - 水力(揚水発電含む)による変動抑制
 - 瞬間導入率は90%にも達する
- **スペイン**
 - オンラインで風力発電の出力予測・制御
- **アイルランド**
 - 北海道とほぼ同じ島で導入率15%達成

風力の変動抑制は火力や連系線だけではない。

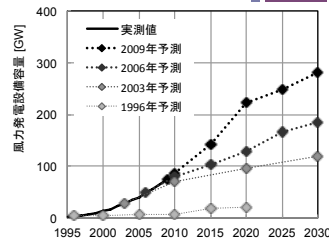
その国・地域にあった多様な手段がある！

50

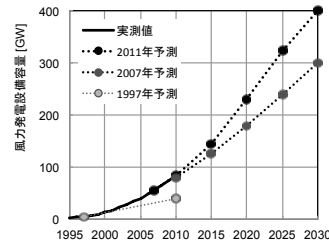
+ 最後に (未来に向けて)

53

- 目標値やロードマップは
 - 「誰かが与えてくれるもの」ではない。
 - 固定化されたものではない。
 - 金科玉条にしてはいけない。
- 常に見直されるもの。
- ダイナミックに進化するもの。
- 再生可能エネルギーの目標値は、欧州ではこれまで常に上方修正されてきた。



欧州委員会の目標値



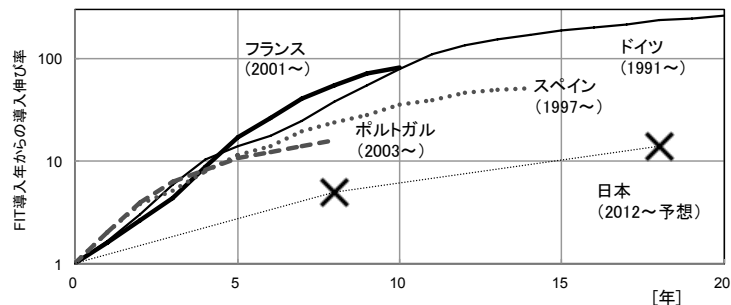
欧州風力エネルギー協会の予測値

(データソース) EWEA: "Pure Power III", 2011より筆者作成

+ 国際比較から見た我が国の可能性

54

- FIT導入国は導入後10年後に風力発電を35~80倍に増加している
- 日本の目標値(予測値)は国際的視点から見て妥当か？



(データソース) IEA: Electricity Information 2013 および環境省: 「低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言」, 2012

+ おまけ (翻訳書の紹介)



- Thomas Ackermann編著
- 日本風力エネルギー学会訳
- 「風力発電導入のための電力系統工学」
- 世界の風力発電大量導入の理論的根拠
- 各国の最新事例なども紹介。

+

再生可能エネルギーの
大量導入のための
電力系統の設計と運用

分散型電力供給
システムのあり方
に関する研究会

ご清聴ありがとうございました。
yasuda@mem.iee.or.jp