



2016年度
第2回シンポジウム
欧州の
電力システム改革と
再生可能エネルギー

京都大学大学院
経済学研究科
再生可能
エネルギー
経済学講座

2017年2月8日(水)
@京都大学

欧州の電力市場設計と再生可能エネルギー 大量導入を可能とする系統技術



京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座
特任教授

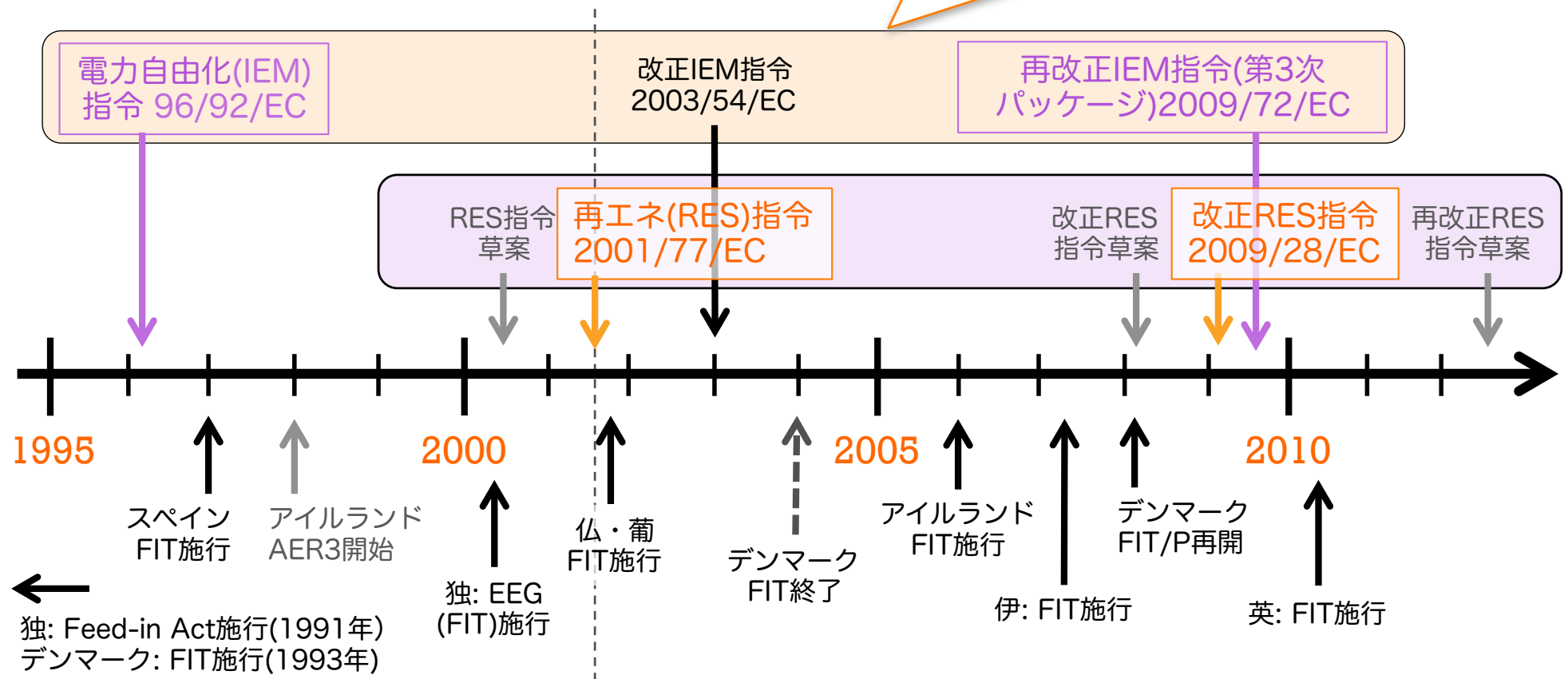
安 田 陽

- 1. 技術史的観点から見た21世紀の電力系統
 - 欧州の電力自由化・再エネ政策の推移
 - 欧州の風力系統連系研究の系譜
 - 系統連系問題に関する世界の論調の推移
- 2. 変動性再エネ(VRE)大量導入時代の市場設計
 - 電力市場と系統運用者の役割分担
 - メリットオーダー効果(VRE導入によるスポット価格低下)
 - 供給信頼度・予備力(調整力)不足の懸念
- 3. VRE大量導入時代の柔軟性の考え方
 - 系統柔軟性
 - コジェネがなぜ柔軟性を持つのか
 - 風力による柔軟性・アンシラリーの供給
- 4. まとめ

+ 欧州の電力自由化・再エネ政策の推移

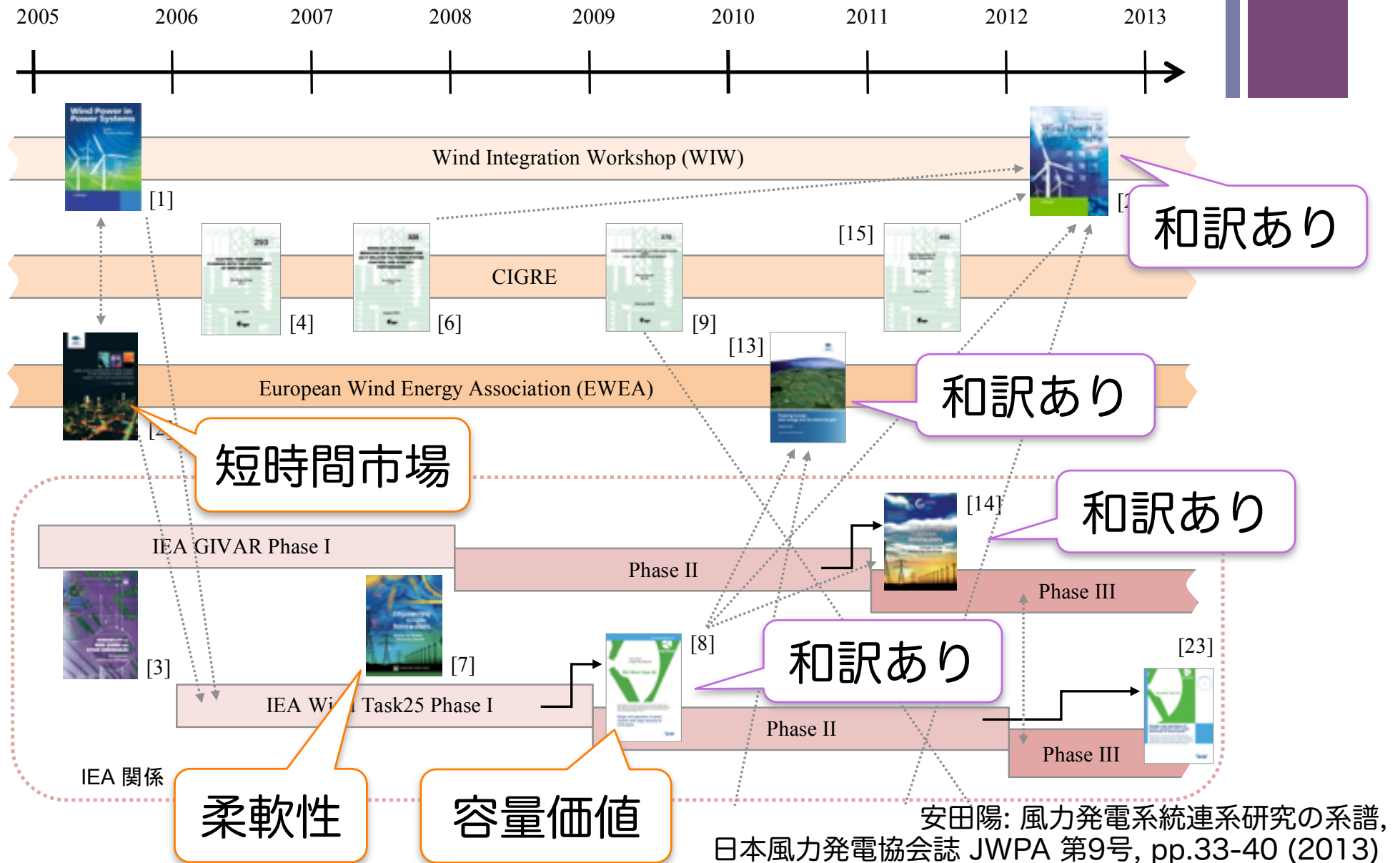
電力自由化と再エネ政策は車の両輪

EU政策

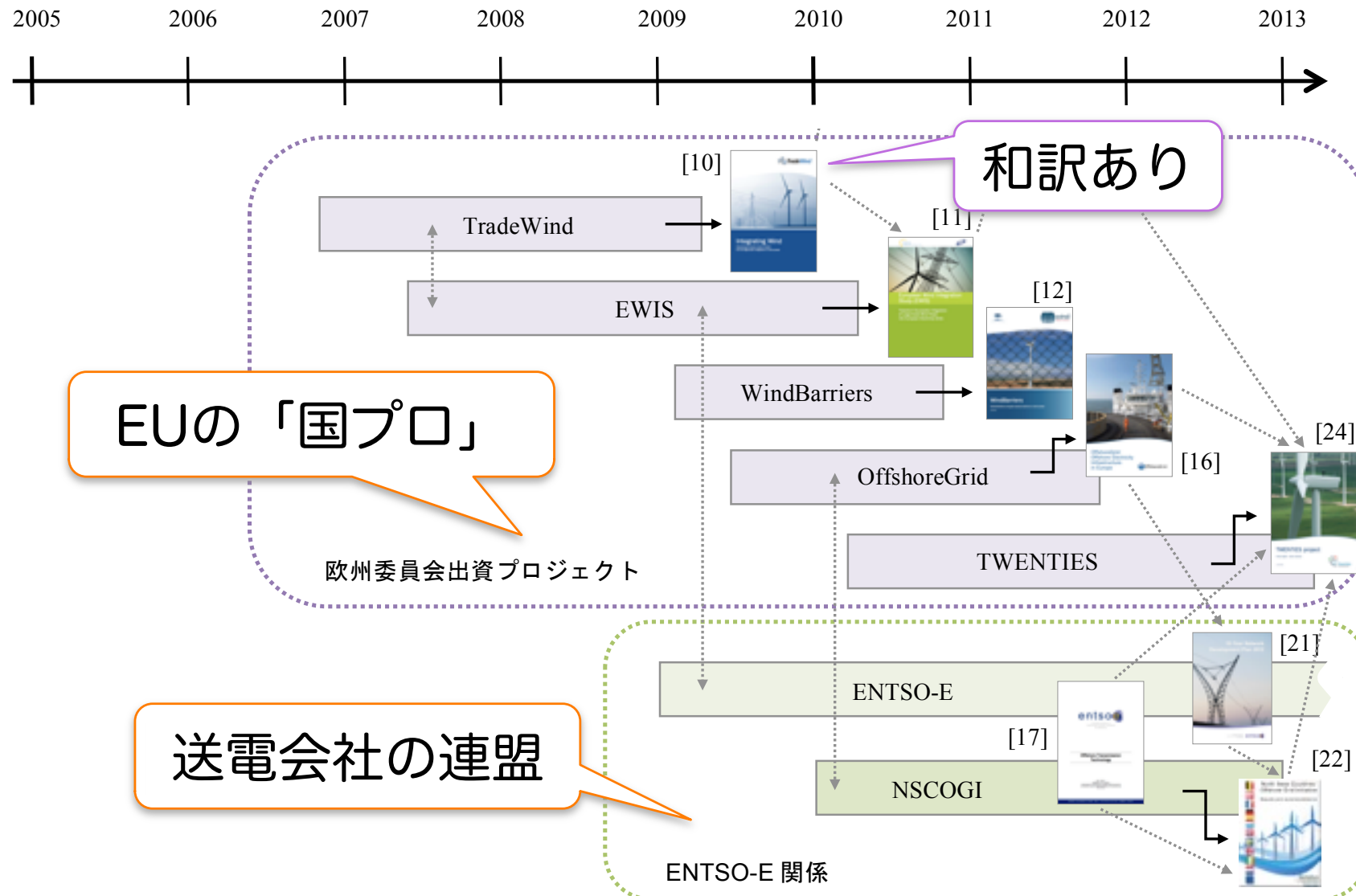


各国政策

+ 欧州の風力系統連系研究の系譜 1



+ 欧州の風力系統連系研究の系譜 2



安田陽: 風力発電系統連系研究の系譜,
日本風力発電協会誌 JWPA 第9号, pp.33-40 (2013)

+ 世界の論調 1



5

- 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。

+ 世界の論調 2



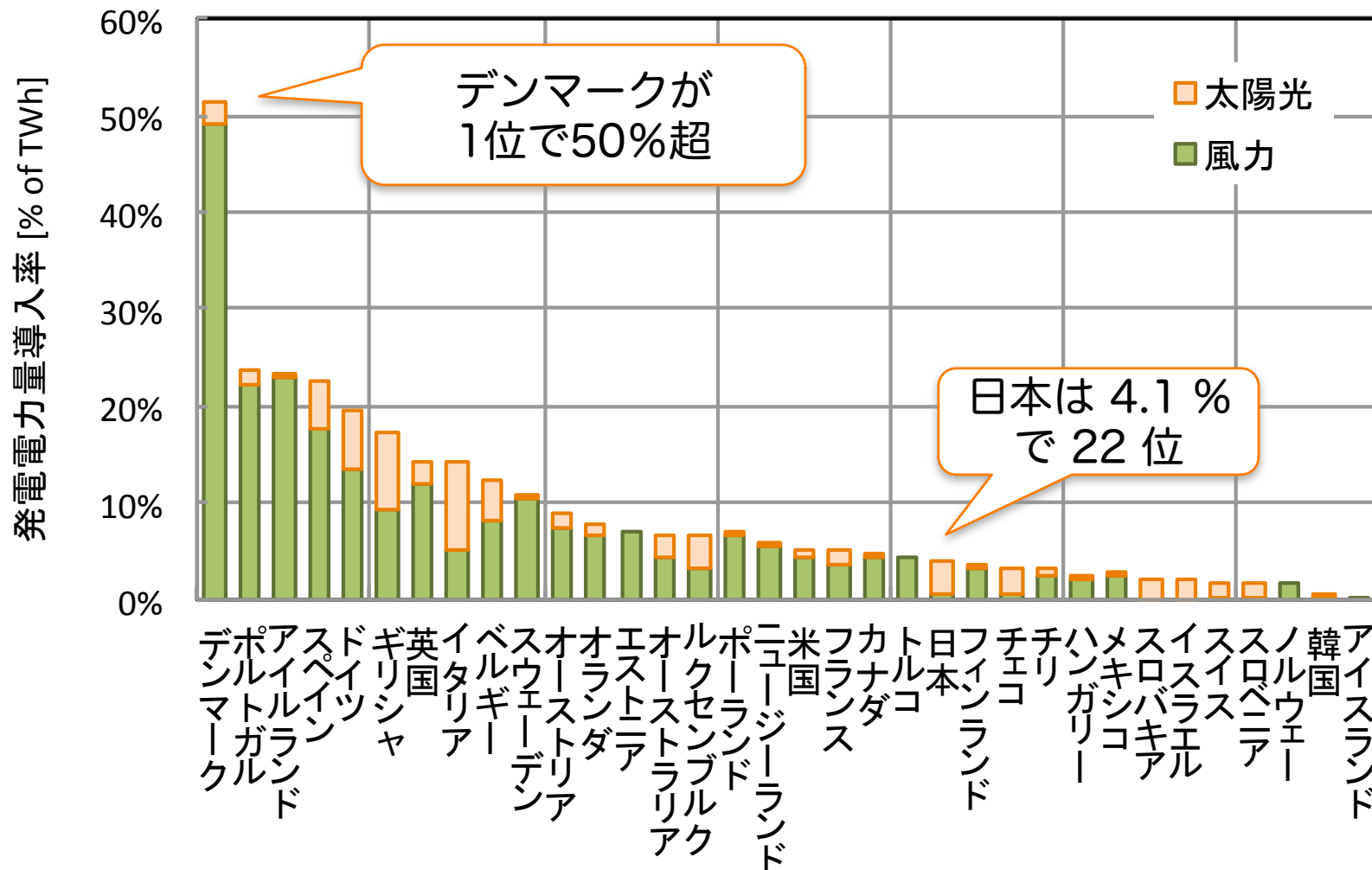
7

- VRE(変動性再生エネルギー)の低いシェアにおいて(5~10%)、電力システムの運用は、大きな技術的課題ではない。
- 現在の電力システムの柔軟性の水準を仮定すると、技術的観点から年間発電電力量の 25~40%のVREシェアを達成できる。
- 従来の見方では、電力システムが持ち得る全ての対策を考慮せずに、風力発電と太陽光発電を増加させようとしてきた。この“伝統的”な考え方では、重要な点を見落とす可能性がある。

(出典) IEA: 「電力の変革」, 2014

http://www.nedo.go.jp/library/denryoku_henkaku.html

+ VRE (変動性再生可能エネルギー) の発電電力量導入率比較 (2015年)

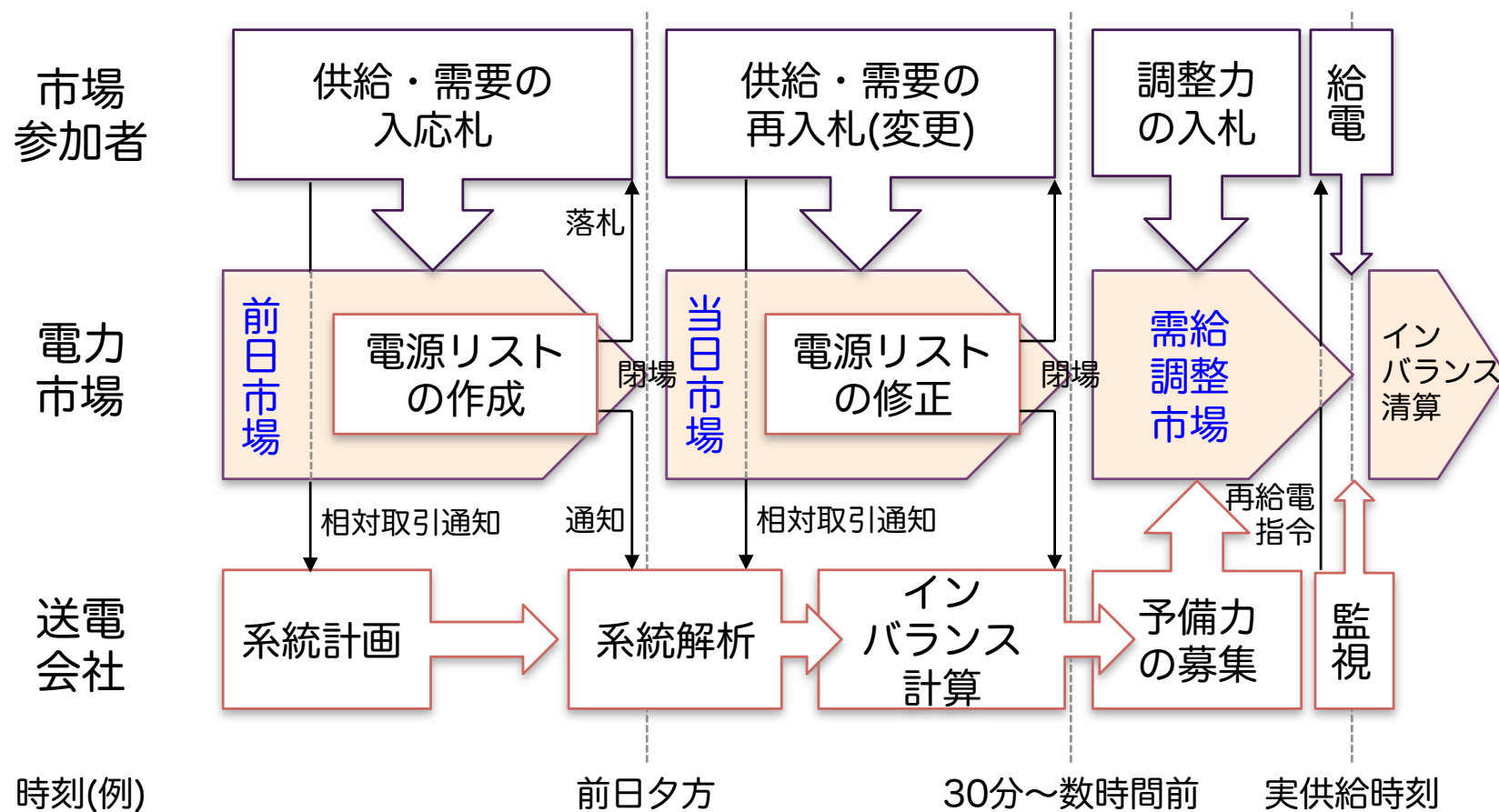


+ 電力市場と系統運用者の役割分担

自由化前：「給電指令」
は電力会社が一元管理



自由化後：「ディスパッチ」は
送電会社と電力市場の二本柱



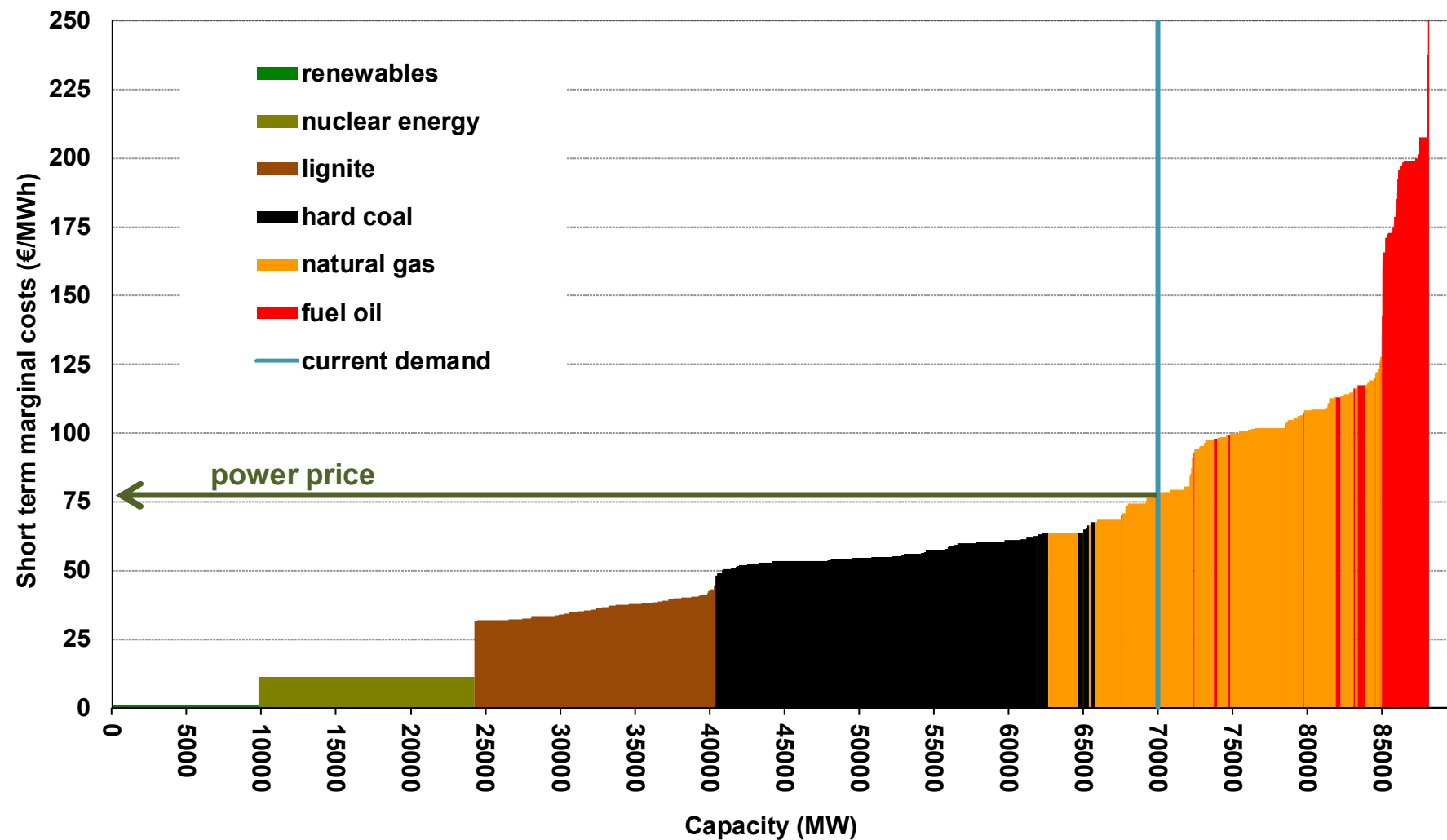
(初出) 安田:「日本のスマートグリッドがガラパゴス技術にならないために」,
SmartGridニュースレター2015年7月号 (一部修正)

+ 発送電分離後の世界

- 「電力会社」はもはや存在しなくなる
 - 発電会社、送電会社、小売会社に分離
- 発電会社
 - 市場メカニズムのもと、競争原理。
 - メリットオーダーによる競争下では、再エネが優位。
 - 火力はエネルギーでなく調整力を売るビジネスに。
- 送電会社
 - 電力系統の「監視」役。市場と二人三脚。
 - ネットワークコストの収入で経営。
 - 再エネを積極的に受け入れるようになる。

+ メリットオーダー曲線

11

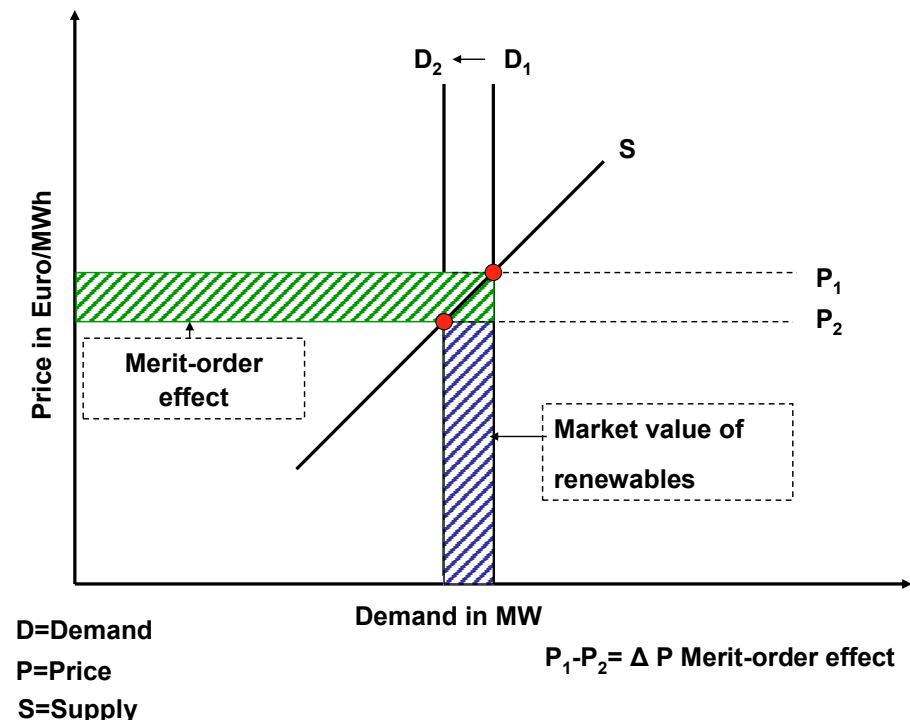


(source) J. Cludius et al: The Merit Order Effect of Wind and Photovoltaic Electricity Generation in Germany 2008-2012, Centre for Energy and Environmental Market (2013)

+ VRE大量導入とスポット価格下落

■ メリットオーダー効果 merit order effect

- メリットオーダー：短期限界発電費用による市場入札
- メリットオーダー曲線：限界費用順の電源リスト
- VREは限界費用が低い
(メリットオーダー曲線
上位に位置する)
- VRE大量導入により
スポット価格が低下
- 1980年代前半より理論化・
2000年代前半に予想。
- 2000年代後半より観測
されはじめる

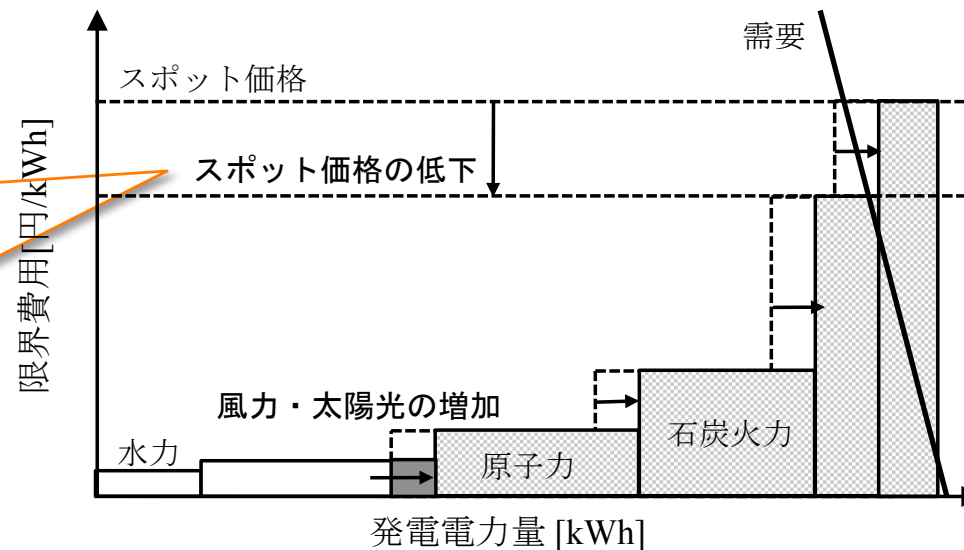
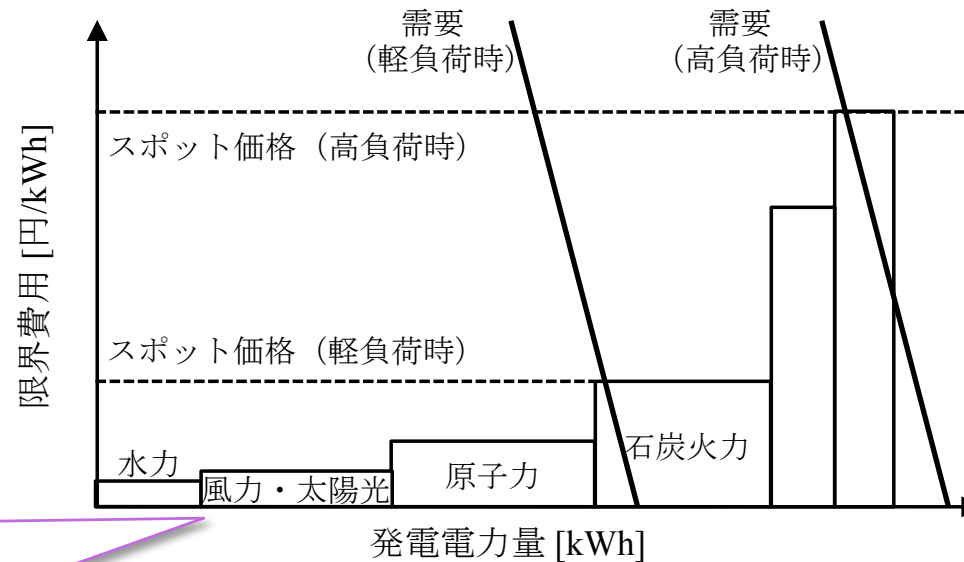


(source) F. Sensfuß et al: The Merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany, Working Paper of Fraunhofer SIS (2007)

+ メリットオーダー曲線による スポット価格 低下の説明

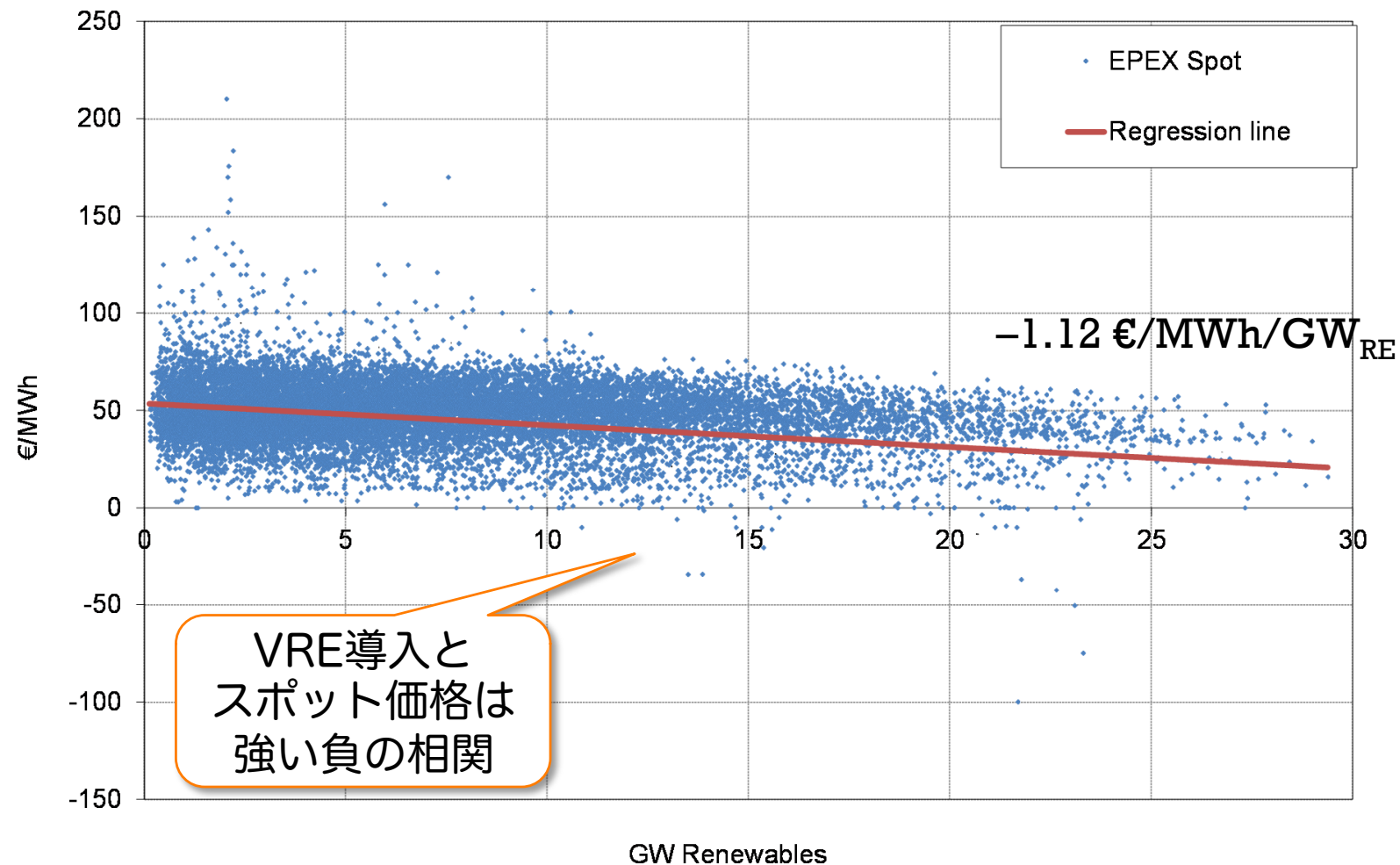
メリットオーダー
曲線では
風力・太陽光は
石炭火力・原子力
より優先

風力・太陽光発電の
メリットオーダー
効果により
スポット価格は
低下する



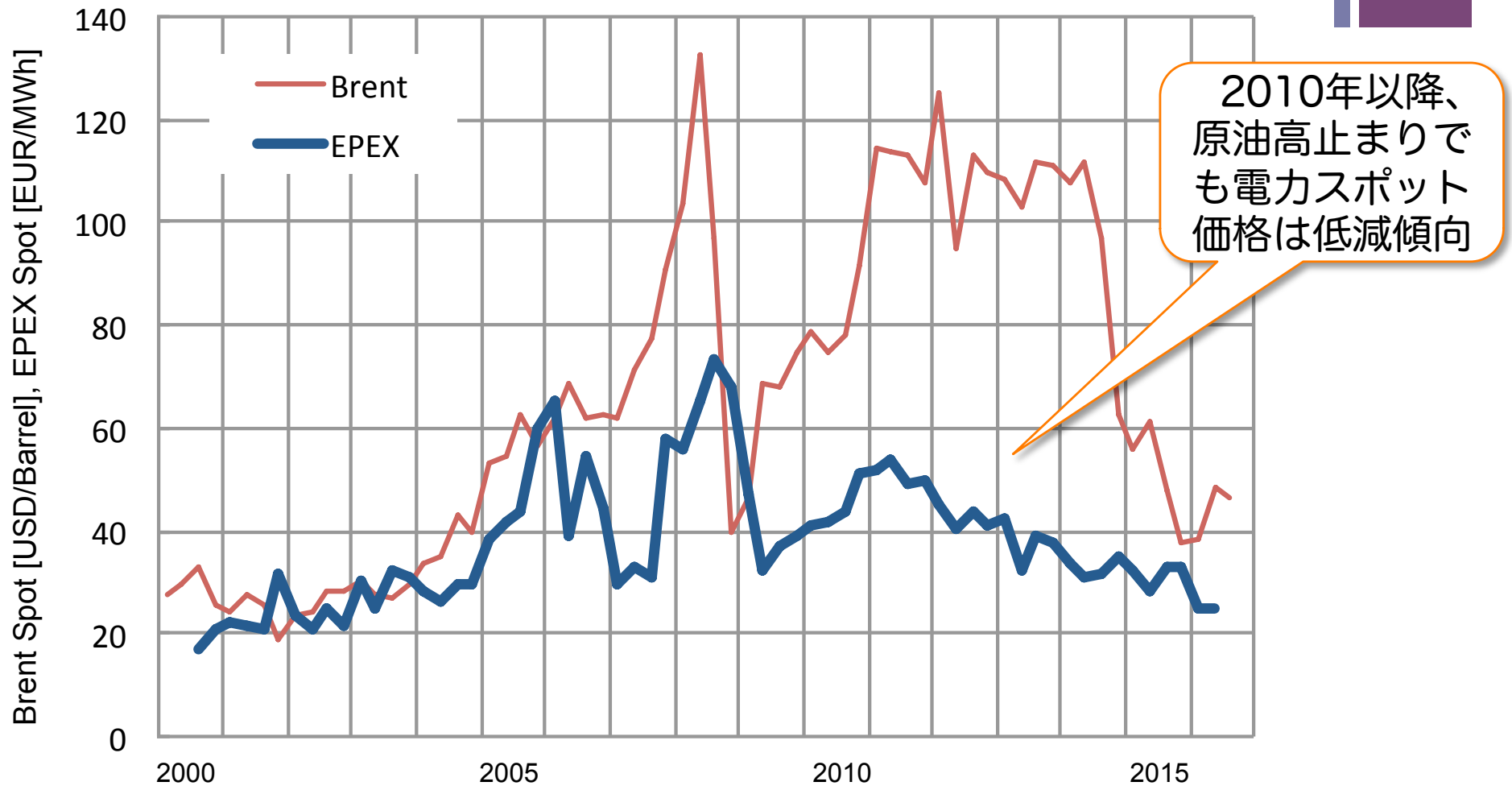
+ VRE大量導入とスポット価格下落

14



(source) J. Cludius et al: The Merit Order Effect of Wind and Photovoltaic Electricity Generation in Germany 2008-2012, Centre for Energy and Environmental Market (2013)

+ 北海原油および欧州電力市場の スポット価格の推移



(データソース) U.S. Energy Information Administration (EIA): Petroleum & other liquid
および European Power Exchange (EPEX): KWK Price より筆者作成

+ VREのメリットオーダー効果が もたらすもの

■ 日本での議論

- スポット価格の低下 ⇒ 火力発電の採算悪化
(ミッシングマネー問題)
- 調整力不足の懸念 ⇒ バックアップ電源、蓄電池
- 供給信頼度不足懸念 ⇒ 容量市場の議論

■ 世界での議論

- スポット価格の低下 ⇒ 本来、消費者にとって良いこと。
- 火力発電の退潮 ⇒ 本来、地球環境にとって良いこと。
- 調整力不足の懸念 ⇒ 柔軟性の市場調達
VREからの柔軟性の供給
- 供給信頼度不足懸念 ⇒ 容量メカニズムの議論
- 新たな市場設計（地点別限界料金、超短時間市場など）

+ E.OnのIrschingガス火力4, 5号機 廃炉問題の真相

- 市場動向を読み誤った投資判断
 - 1990年代後半以降のガスタービンブーム。
ガスタービンへの投資がすでに過剰であった可能性。
 - Irsching 4, 5号機：2010～2011年に運開。
 - 市場が求めるものは「柔軟性」。
 - 59.7%を誇る高効率が却ってアダに。
 - 部分負荷の変動出力では低効率、収支回収の見込み低い。
 - 既に予想されていたVREのメリットオーダー効果を軽視。
- 経営方針の変化
 - 新規電源を廃炉にした方が特別損失で計上できる。
 - 採算性の悪い火力部門を分離し、収益性の高いRE部門に資本集中。

+ 日本になかなか伝わらない 欧州の電力情報

- 分離後の送電会社 (TSO) :
 - 収益性が安定、積極投資。
 - 多くのTSO/DSOはガス網も買収・合併
(コジェネや熱供給がやりやすい)
 - 規制機関に厳しく監視される
(電力安定供給+再エネ大量導入=イノベーション)
- 分離後の発電会社 :
 - 再エネ投資組 (DONG, Ebeladora):
堅調、他国にも積極進出
 - 再エネ非投資組 (E-On, Vattenfall):
ガス・石炭偏重で業績悪化、再エネ重視に方針転換

ポーター仮説
環境規制は
イノベーション
を促進する

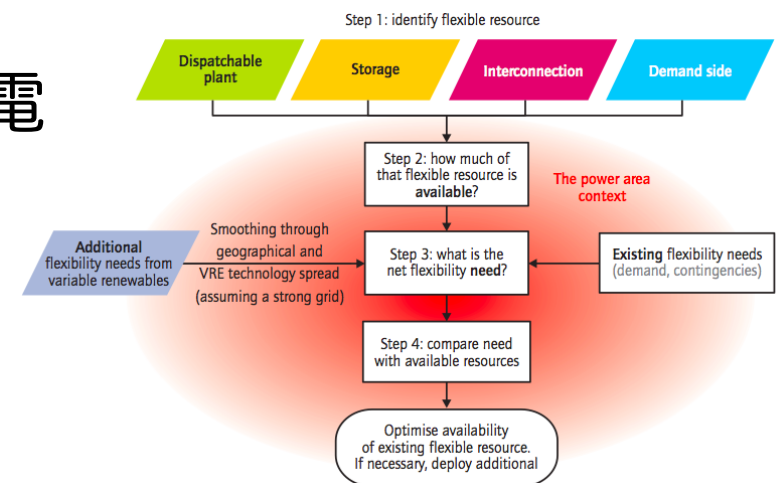
+ 系統柔軟性 flexibility

19

世界で活発に議論
(日本ではまだまだ?)

- 再エネ大量導入のための重要な指標
- 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。
 - 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

風力を調整するのは
火力だけではない！



+バックアップ電源 vs 柔軟性

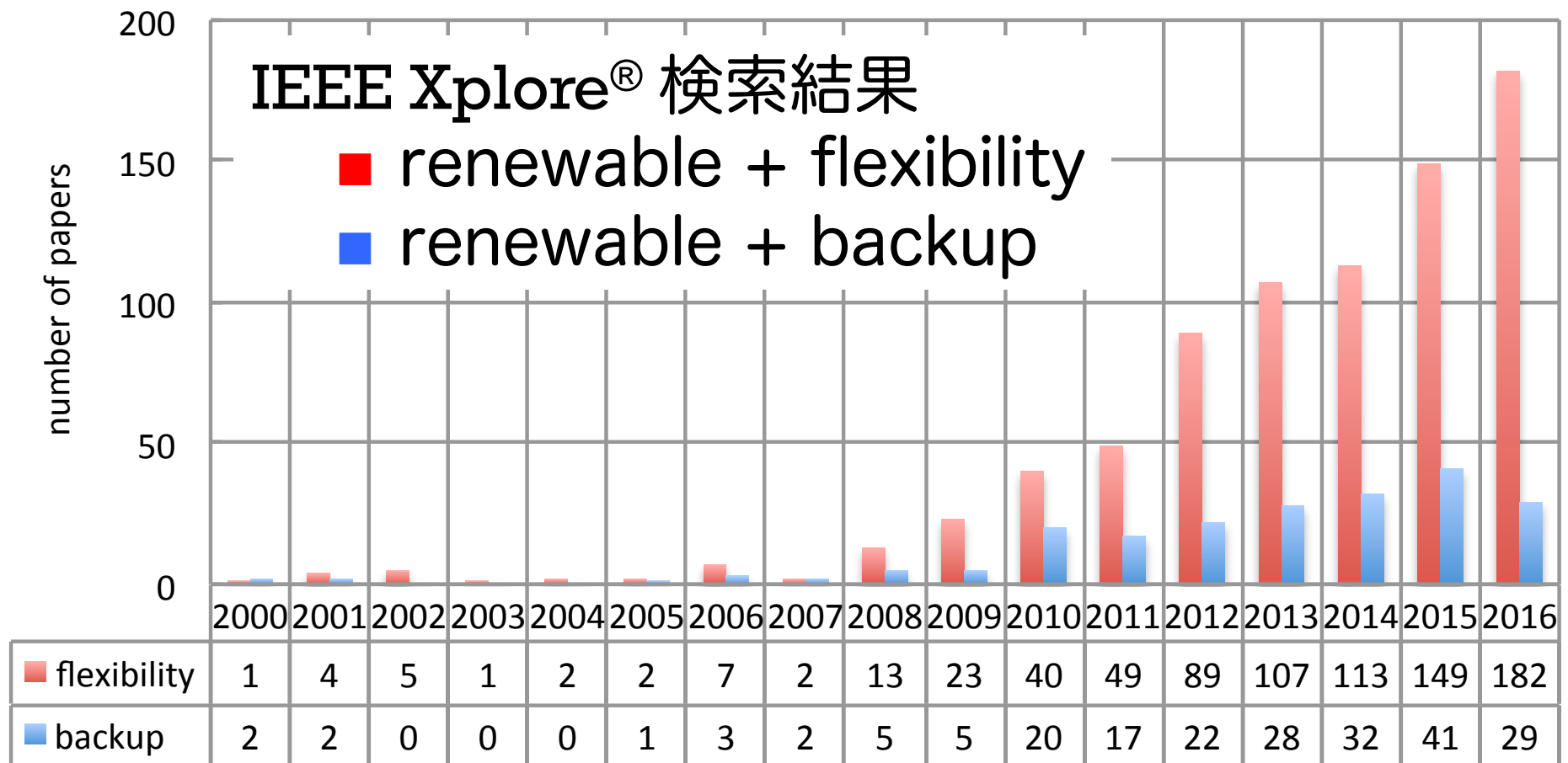
20

機関・団体	文献名	backup or back-up	flexible or flexibility
気候変動に関する政府間 パネル (IPCC)	Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation	16	102
国際エネルギー機関 (IEA)	Harnessing Variable Renewables – A Guide to the Balancing Challenge	2	614
	The Power of Transformation, – Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems	5	254
経済協力開発機構原子力 機関 (OECD/NEA)	Nuclear Energy and Renewables – System Effects in Low-carbon Electricity Systems	82	239
国際電気標準会議 (IEC)	White Paper on “Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large- capacity Electrical Energy Storage	0	125
第6次枠組み計画 (FP6) (欧州委員会の科学技術 プロジェクト)	Integrating Wind – Developing Europe’s power market for the large-scale integration of wind power	3	97
インテリジェントエネル ギー (欧州委員会の科学 技術プロジェクト)	European Wind Integration Study – Towards A Successful Integration of Large Scale Wind Power into European Electricity Grids	1	39
欧州送電系統運用者ネッ トワーク (ENTSO-E)	Ten-Year Network Development Plan 2014	0	75
欧州電気事業連盟 (Eurelectric)	Flexible generation: Backing up renewables	4	5
米国連邦エネルギー規制 委員会 (FERC)	Transmission Planning and Cost Allocation by Transmission Owning and Operating Public Utilities	0	84
北米信頼度協議会 (NERC)	Accommodating High Levels of Variable Generation	1	43

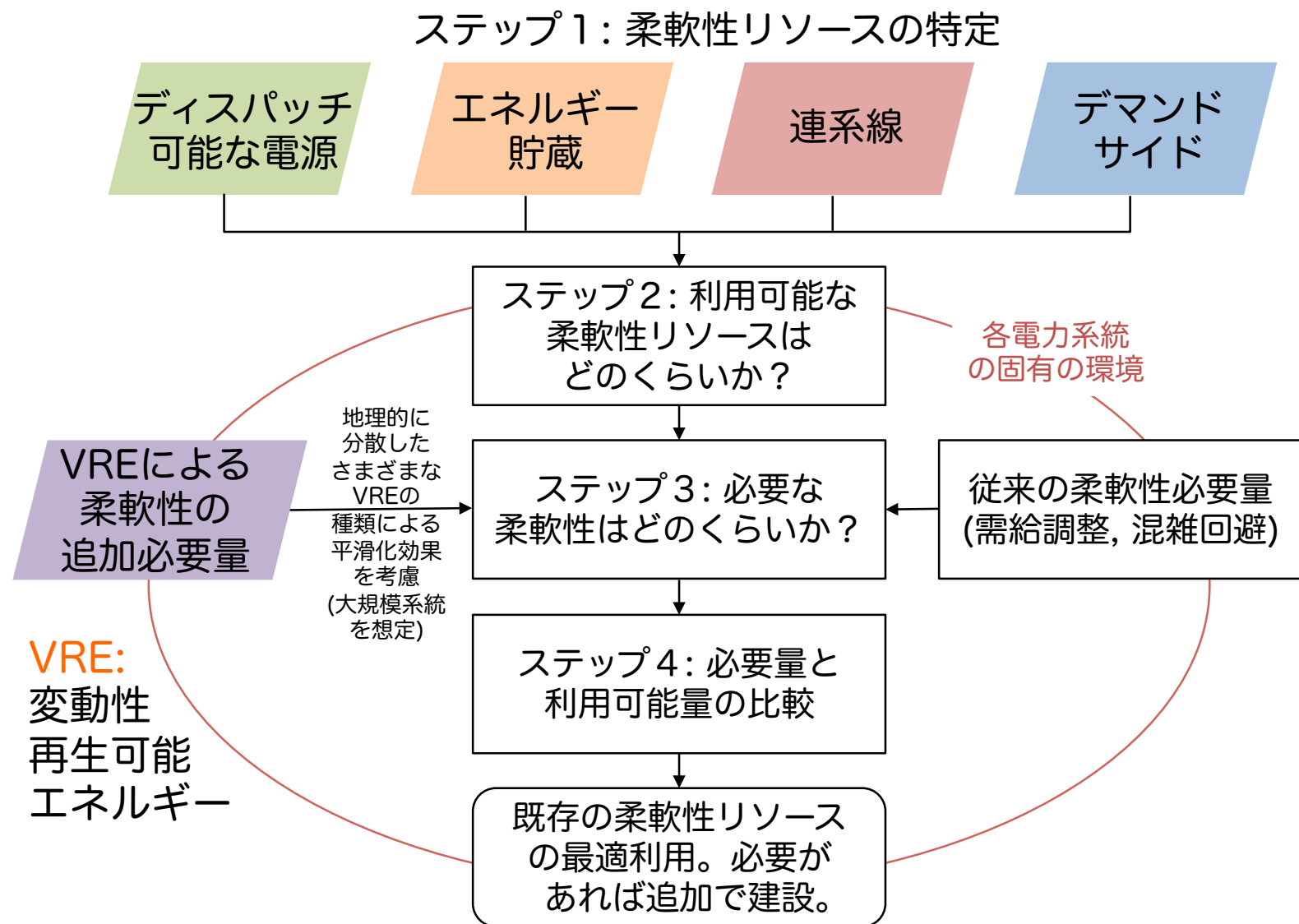
(出典) 植田・山家編著, 安田他: 「再生可能エネルギー政策の国際比較」, 京都大学学術出版会 (2016)

+ 柔軟性 vs バックアップ

21



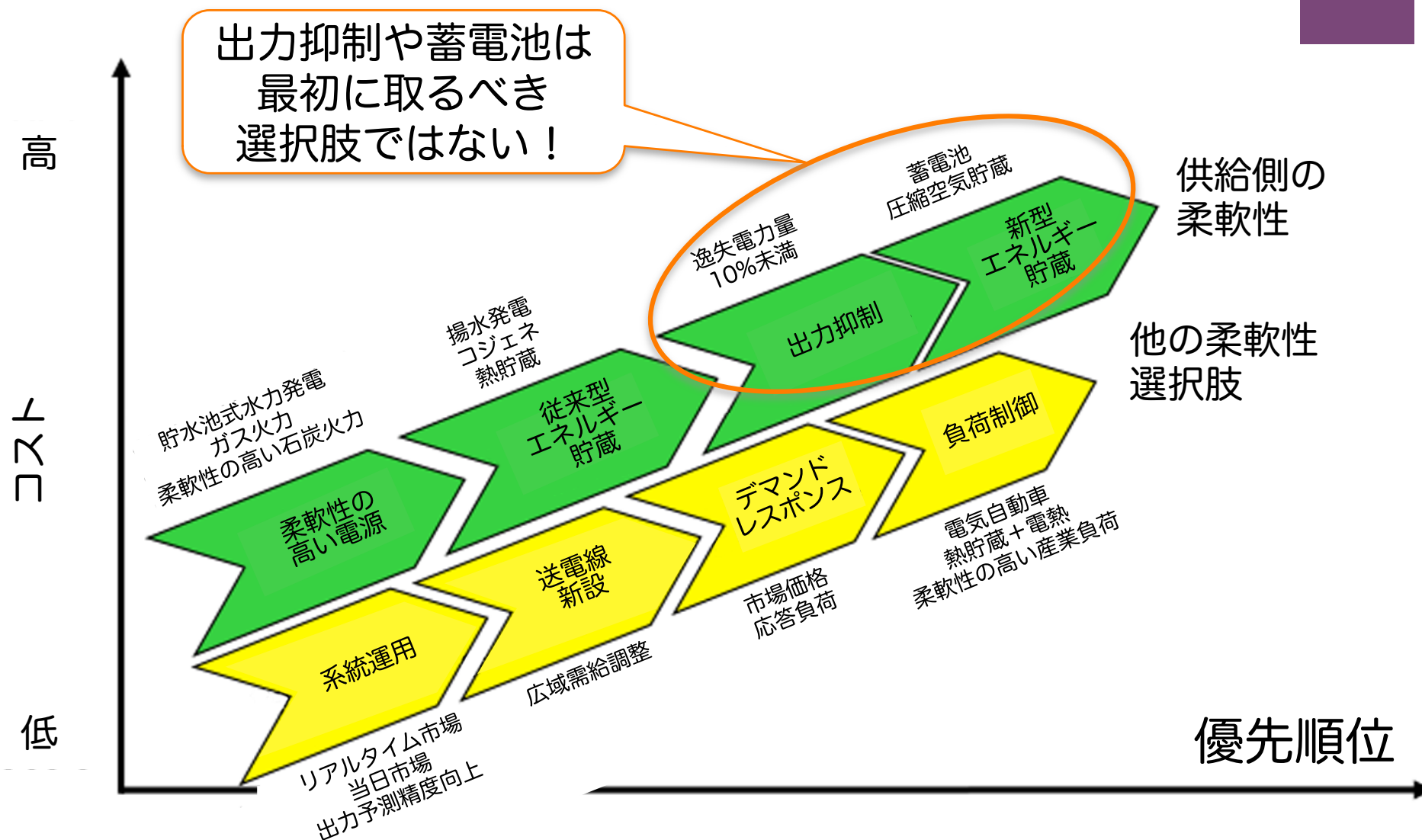
+ 合理的な系統柔軟性の選択



IEA: Harnessing Variable Renewables (2011)をの図を元に安田翻訳。

(出典) 植田・山家編著, 安田他:「再生可能エネルギー政策の国際比較」, 京都大学学術出版会 (2016)

+ 柔軟性リソースの優先順位



+ コジェネがなぜ柔軟性を持つのか？

- コジェネ (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。

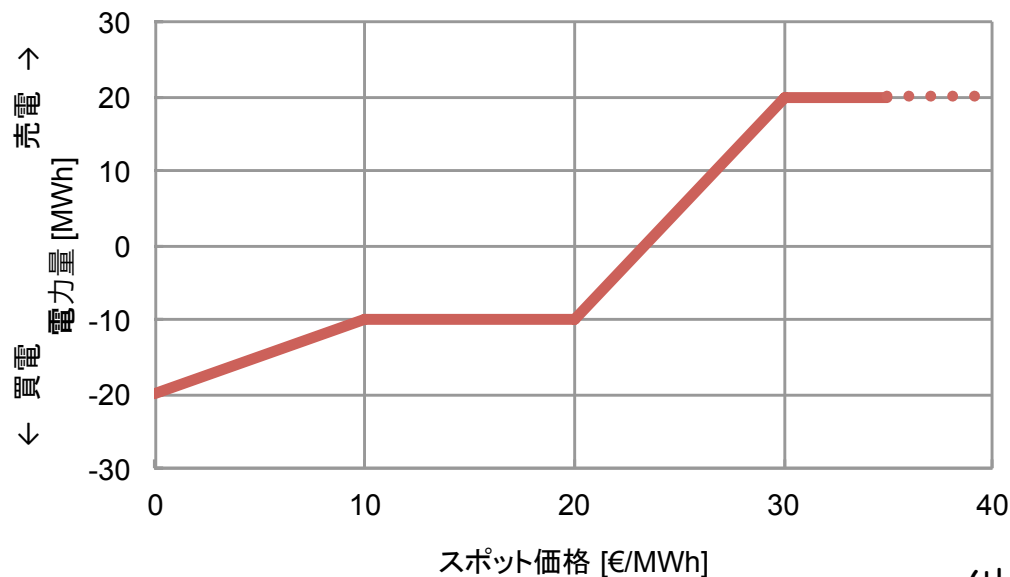


2006年に法制化

- デンマークでは、コ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。

+ コジェネがなぜ柔軟性を持つのか？

- デンマークのコジェネは、系統運用者(TSO) だけでなく電力市場とも通信する。
- コジェネは市場価格を見ながら自動運転。
- TSOが給電指令(介入)する前に混雑緩和
- 数千台のコジェネが仮想発電所 (VPP) として動作。



これが本来の
「スマートグリッド」
のはずでは？

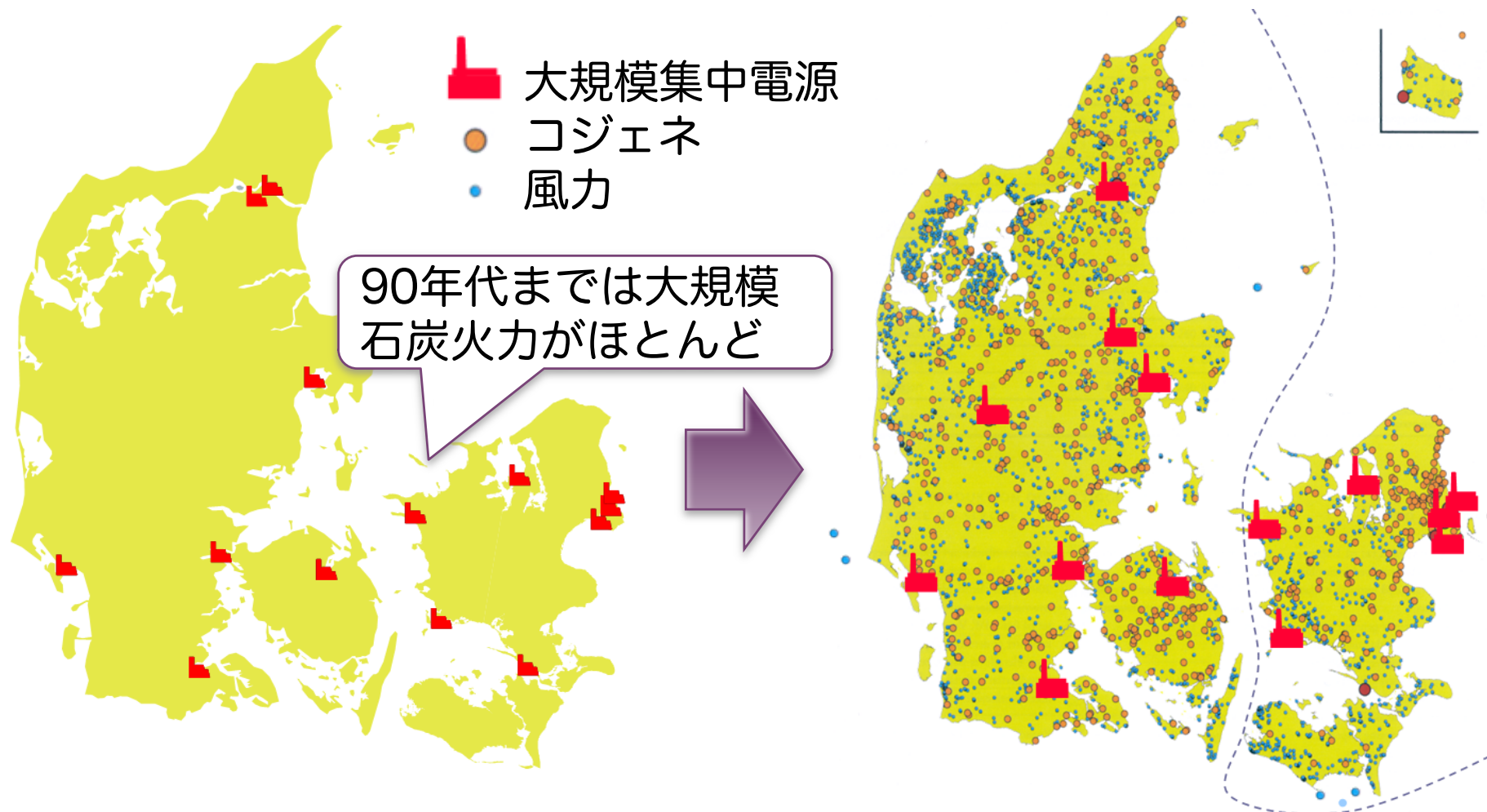
+ 電源構成の変化

26

大規模集中電源（1980年代頃）

小規模分散型コジェネ
を積極的に導入

分散型電源（現在）



(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

+ 日欧スマートグリッド事業 におけるワード調査

27

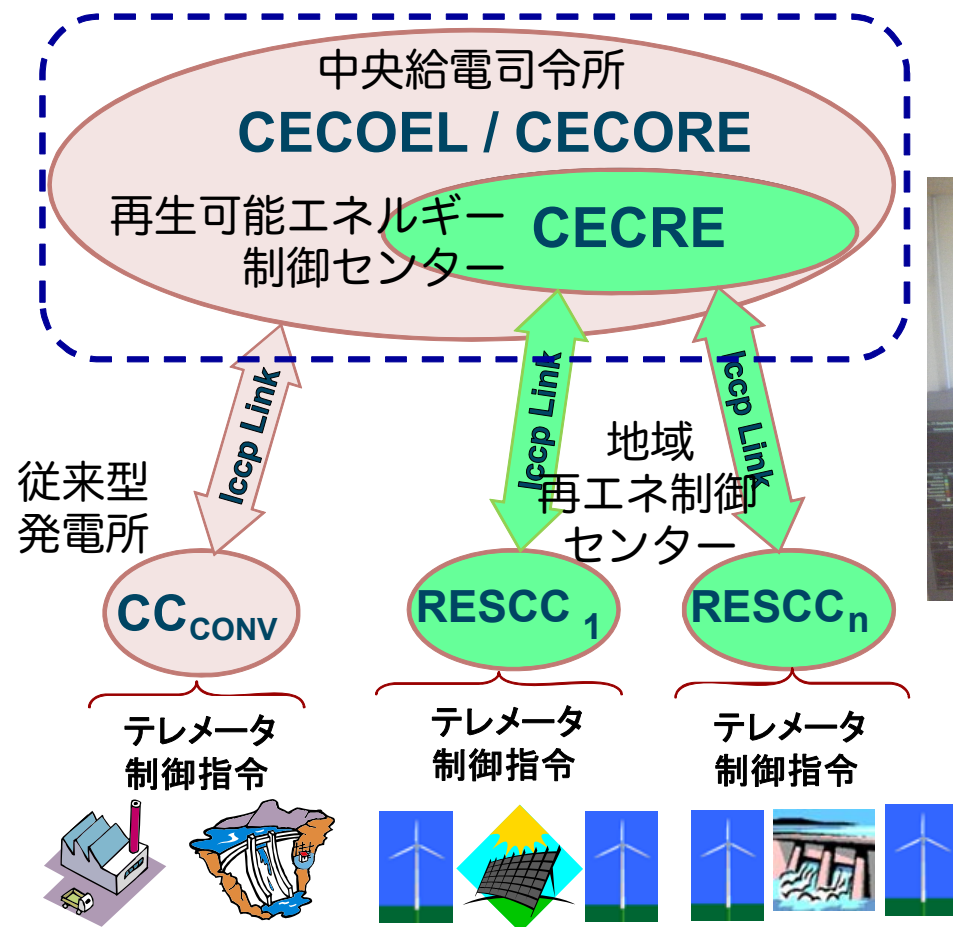
	日本		欧州	
	文献A	文献B	文献C	文献D
蓄電池	186	31	6	11
電力市場	0	0	173	39

日本は市場取引という概念が欠落している！

(出典) 市山翔太: 関西大学
卒業論文(2017予定)

- A. 経産省: 次世代エネルギー・社会システム実証マスタープラン 4事業 (2010)
http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/community.html
- B. 経産省:次世代エネルギー・社会システム協議会 第18回資料 4事業報告 (2016)
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/018_haifu.html
- C. JRC Reference Report: Smart Grid projects in Europe (2011)
https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses/files/documents/smart_grid_projects_in_europe.pdf
- D. Energinet.dk: "Denmark opt for Smart Grid - Intelligent power system with more renewable energy",
<https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20dokumenter/Forskning/SmartGrid%20in%20English.pdf>

+ 風力発電出力予測・制御技術 (スペインでの実用例)



これが本当の「スマート
グリッド」のはずでは？

+ 再生可能エネルギー制御センター

- 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1%程度)。

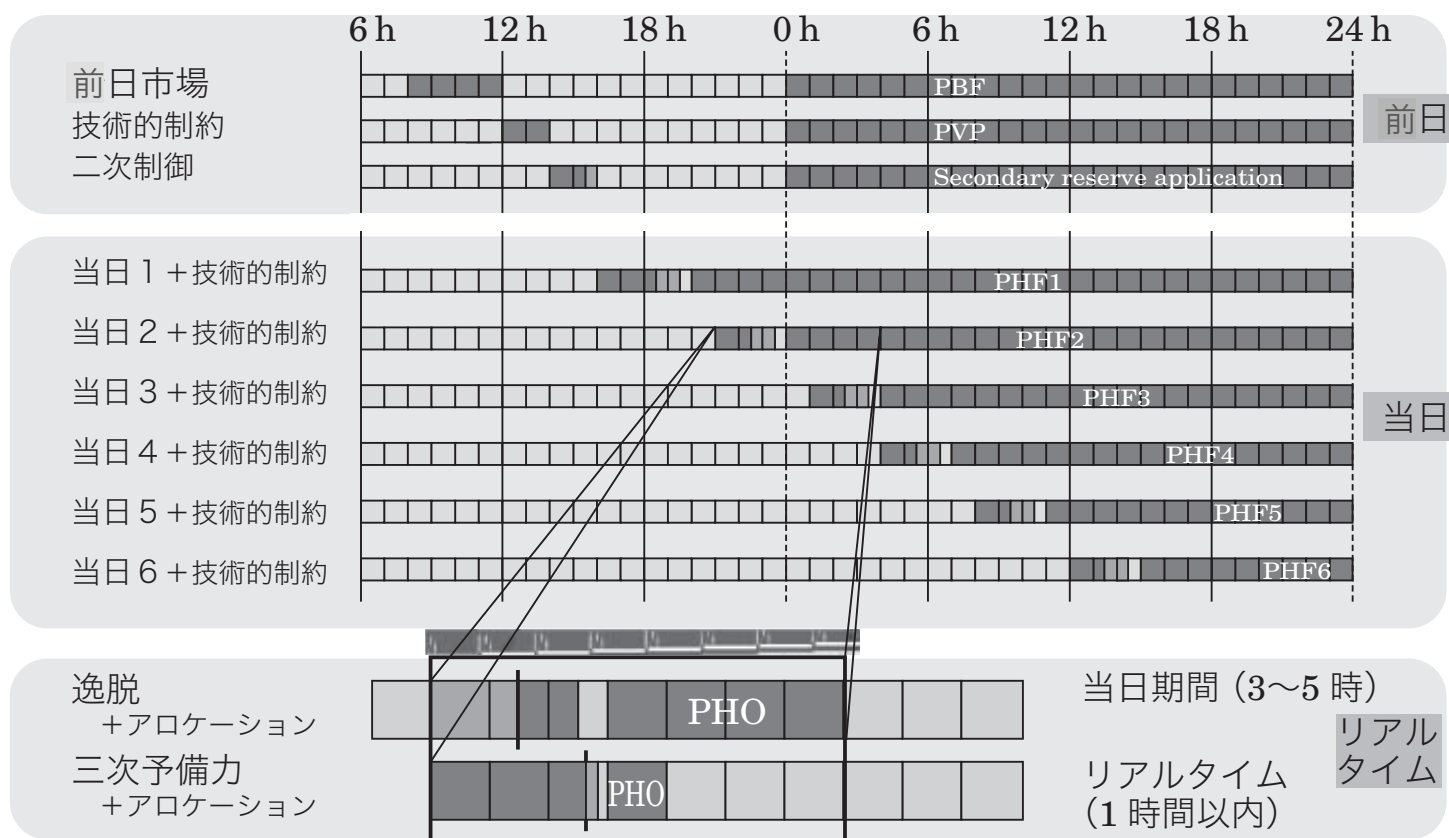


- スペインでは、変動電源に通信要件を課すことにより大量導入を可能に。
 - 監視・制御機能を義務づけ (スペイン王令)
 - 系統安定度を維持しながら大量導入を実現。

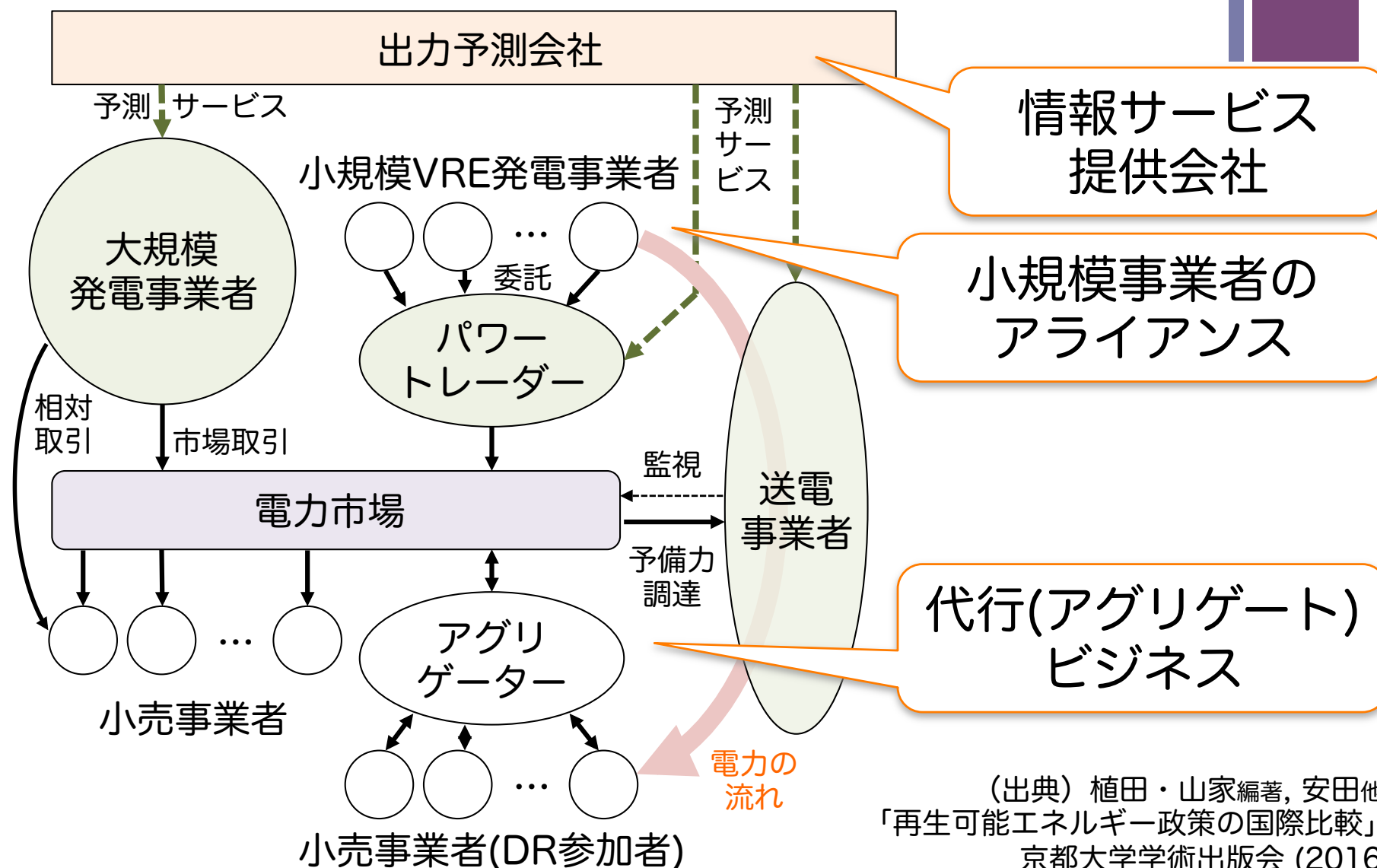
+ イベリア電力市場の構成

VREを受け入れ易いきめ細かやかな市場設計。

VREの出力予測は短時間市場があってこそ。



+ 自由化市場における情報サービス



(出典) 植田・山家編著, 安田他:
「再生可能エネルギー政策の国際比較」,
京都大学学術出版会 (2016)

+ 風力発電の柔軟性供給能力

日本では未だに
この考え方が主流

■ Was:

- 「不安定電源でバックアップが必要」
- 予測できない。信頼性がない。
- non-dispatchable

欧米では2000年代後半より
イノベーションが進む

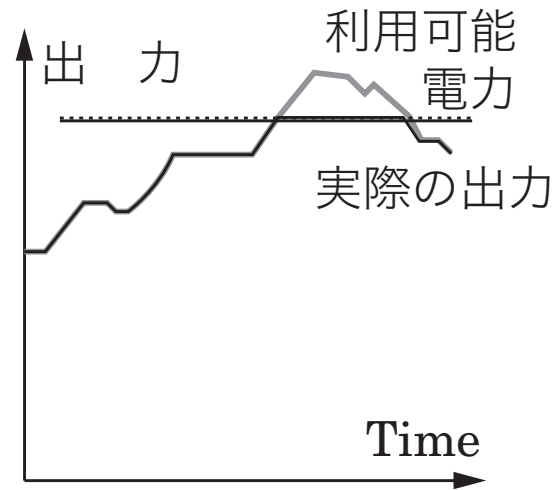
■ Now:

- 変動電源だが、市場設計と予測技術の組み合わせにより、信頼性が向上
- 必要に応じて上方/下方予備力、無効電力なども供給可。
- もはやdispatchableな電源と見なせる。

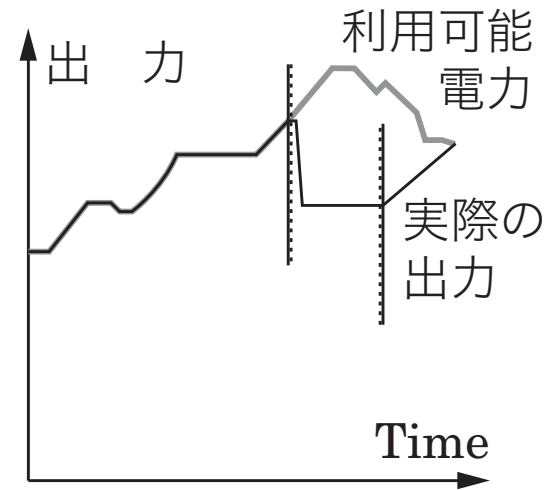
+ ディスパッチ可能な変動性電源

- An interesting result to note related to the system recently implemented at SPP called Dispatchable Variable Energy Resources (DVERs). These resources, which make up about two-thirds of the installed wind power, can be dispatched in the real time market, allowing SPP to automatically signal, through a dispatch set-point, when it is efficient to curtail the wind to manage congestion or to ensure there is sufficient balancing.
- 【訳】 最近SPP(南西部パワープール)で導入された電力系統に関する注目すべき興味深いものとして、「**ディスパッチ可能な変動性電源**」(**DVER: Dispatchable Variable Energy Resources**) と呼ばれるものがある。これらの電源は設置された風力発電の3分の2に相当し、リアルタイム市場にディスパッチ可能である。送電混雑の管理や需給調整を確実にするために風力発電の出力抑制を行うことが効率的である場合、これらの電源に対してSPPはディスパッチ指令値といった信号を自動で送ることができる。

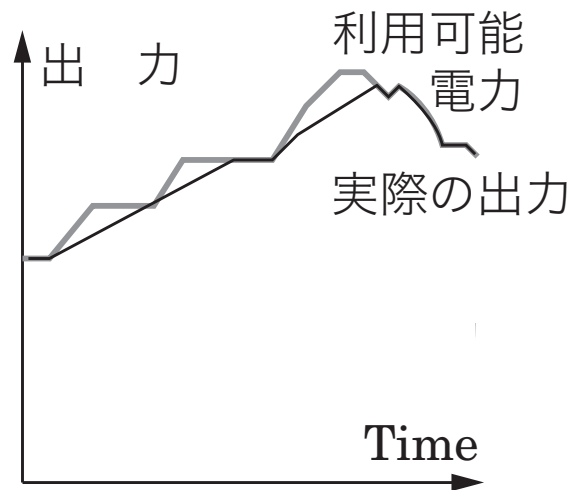
+ 風力発電所の系統運用への貢献



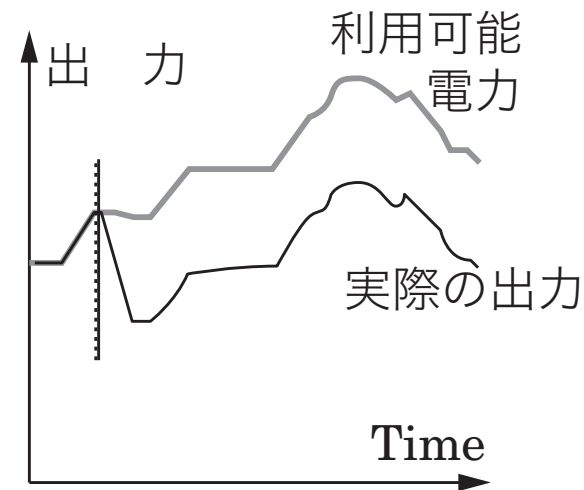
(a) 出力抑制



(b) 需給バランス制御

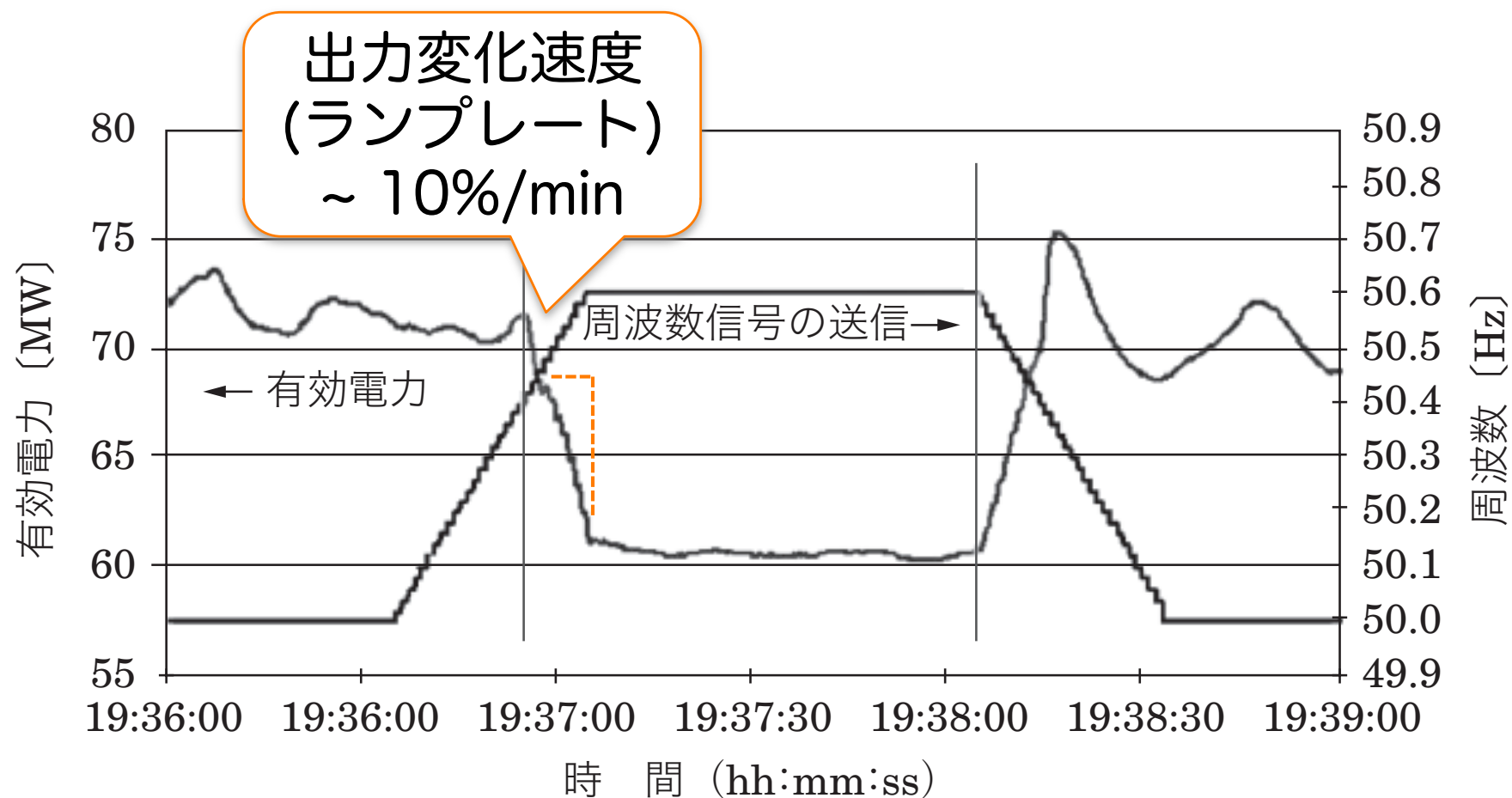


(c) ランプ制御



(d) デルタ制御

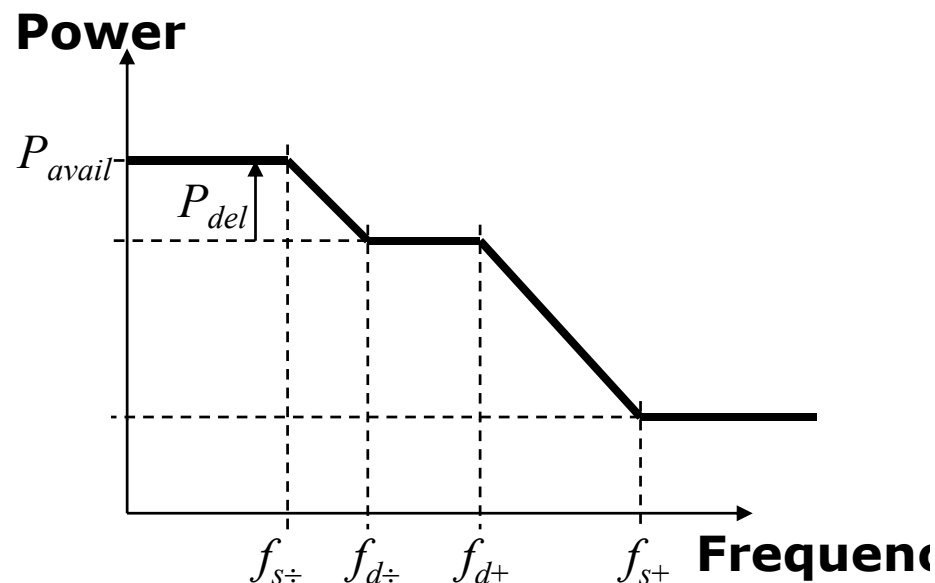
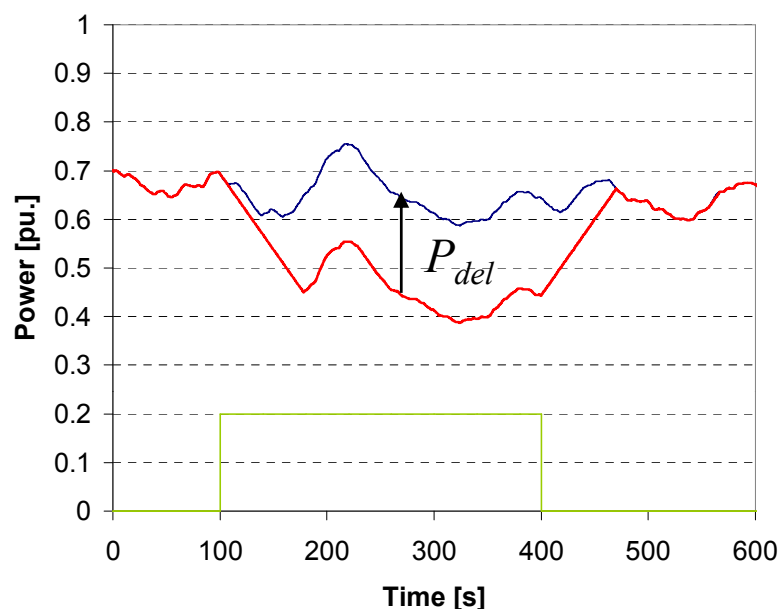
+ 風力発電所の周波数応答試験 (Siemens Wind)



+ デルタ制御試験 (デンマーク)

周波数調定率制御

- 上方および下方予備力を提供可能
- デンマークでは洋上風力発電所 (Horns Rev および Nysted) に実装済み



(出典) P. Sørensen: Frequency control in power systems with large scale wind power, Risø DTU (2009)

+ 風力発電所の柔軟性と電力市場

- 出力変化速度の制限は、**それを行うことが正当化される系統運用条件に対してのみ行うことができ、多用すべきではない。**
- ほとんど大多数の系統運用条件では、**他の従来型電源でこの機能** (注: ガバナ応答制御) **を提供した方がよりコスト効率が高くなる。** 風力発電所のこの機能が系統から必要とされるときのみ、この能力を提供することが望ましい。

(出典) Ackermann編著:「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社 (2013) 第13章

- 現在では、風力からの柔軟性はスポット市場で取引した方が有利。
- 将来、需給調整市場で競争力を持つ可能性も。
- 火力発電はエネルギーではなく調整力で稼ぐビジネスに。

+ まとめ

38

- 火力なしで電力安定供給は可能か？
 - 技術的には「Yes」。長期的には「Yes」。
- 現状
 - 風力発電はアンシラリー（上方/下方予備力，無効電力）供給能力を既に持つ。
 - 分散型電源は通信技術により、系統運用に貢献する。
 - スマートグリッド，VPPは市場取引がベース。
 - ただし現時点では、火力による供給の方が便益が高い。
- 将来
 - 火力によってエネルギー（kWh）を供給するのは外部コストが高い。⇒ 炭素税、排出権取引による内部化。
 - 中期的(2030年頃)：火力は柔軟性で稼ぐビジネスに。
 - 長期的(2050年頃)：風力など分散型電源が調整力も担う。

+ 本日の参考文献



- 植田和弘・山家公雄編: 「再生可能エネルギー政策の国際比較」, 京都大学学術出版会 (2017)
- 安田陽: 「日本の知らない風力発電の実力」, オーム社 (2013)
- 安田陽: 風力発電大量導入を実現する電力システムとは, 太陽エネルギー, Vol.41, No.4, pp.25-32 (2015)
- 安田陽: 再生可能エネルギー大量導入を可能とする系統柔軟性 ～風力発電が電力系統に提供できるアンシラリーサービス～, 火力原子力発電協会誌, Vol.66, No.8, pp.439-449 (2015)
- T. アッカーマン編著, 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」, オーム社 (2013)





欧州の電力市場設計と 再生可能エネルギー 大量導入を可能とする 系統技術

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

京大再エネ経済学講座
シンポジウム
欧州の
電力システム改革と
再生可能エネルギー