



第49回
京都大学
再生可能エネルギー経済学
研究会



2016年11月1日(火)
@京都大学

風力発電のアンシラリー供給能力 ～火力発電なしで電力の安定供給は可能か？～



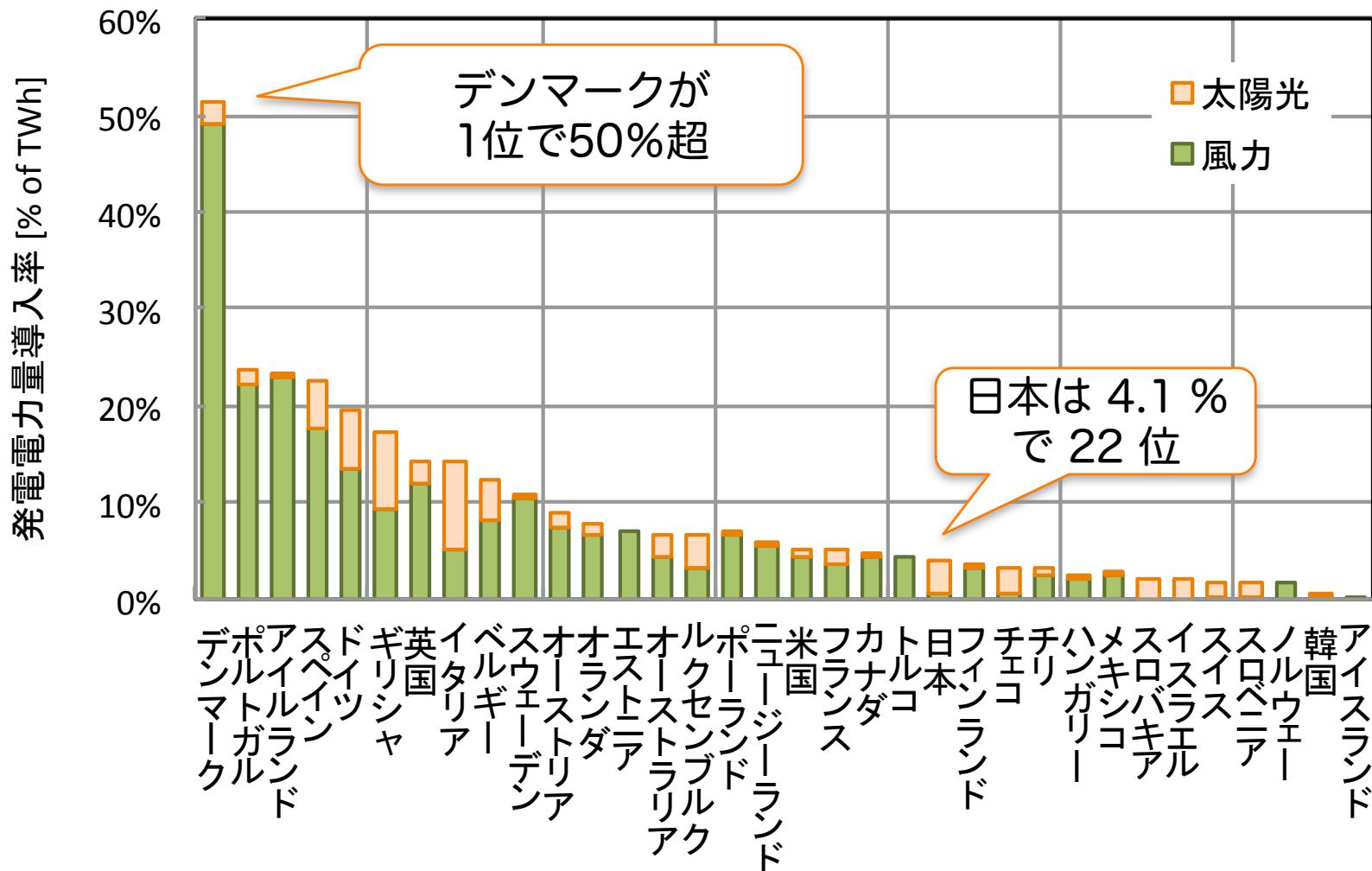
京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座
特任教授

安 田 陽

+ 目 次

- 1. はじめに
 - 世界で何が議論されているか？
 - VREのメリットオーダー効果と火力発電の退潮
- 2. VRE大量導入時代の柔軟性の考え方
 - 系統柔軟性の供給源
 - 火力・原子力による柔軟性の供給
 - 風力による柔軟性・アンシラリーの供給
- 3. VRE大量導入時代の供給信頼度の考え方
 - kW価値と容量クレジット
 - N-1基準
- 4. VRE大量導入時代の市場設計
- 5. まとめ

+ 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)



(data source) IEA Electricity Information 2016

+ 世界の論調



- VRE（変動性再エネ電源）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

+ なぜ世界中で再生可能エネルギーが促進されるのか？

日本では定量的議論
が非常に少ない

■費用便益比が大きいから。

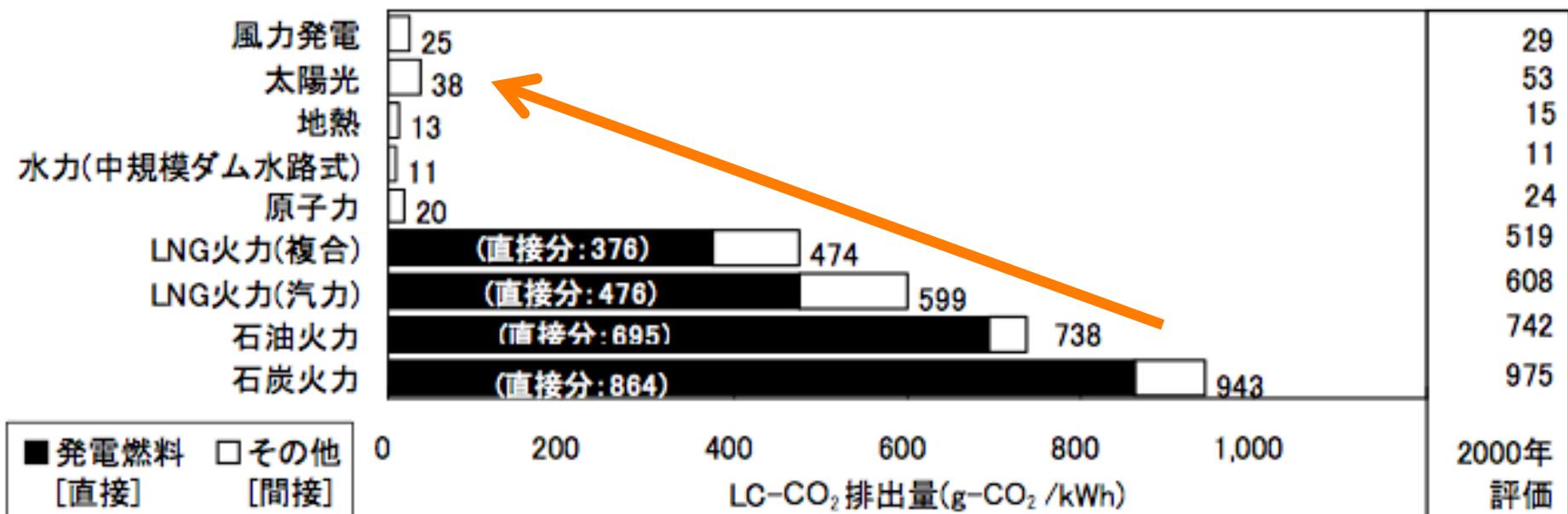
- かけたコスト(費用)よりも市民にもたらされるリターン(便益)が大きい。
- コストはそれなりにかかる。コストが高いからといって投資を控えると、便益が得られない。

■外部コストが一番低い電源だから

- 外部コストはゼロではない(騒音・景観影響 etc.)
- 外部コストがゼロではないからと言って排除すると、更に外部コストの高い電源を選択しなければならなくなる。

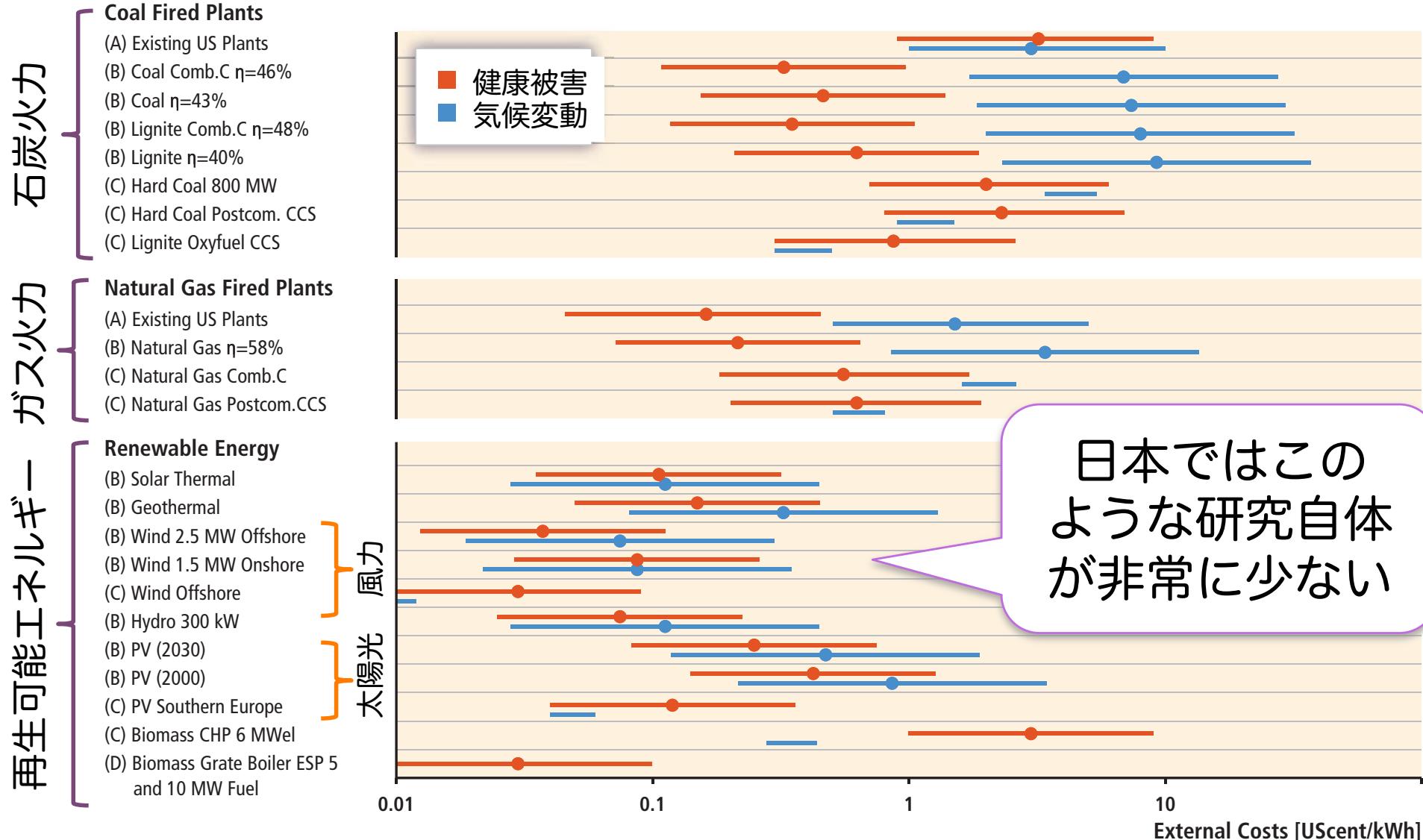
+ 再生可能エネルギーの便益

- 化石燃料の削減
 - 健康被害の抑制
 - 輸入依存度低減
 - 自然保護
- CO₂削減
 - 異常気象の抑制
 - 生態系への影響
- その他
 - 雇用創出



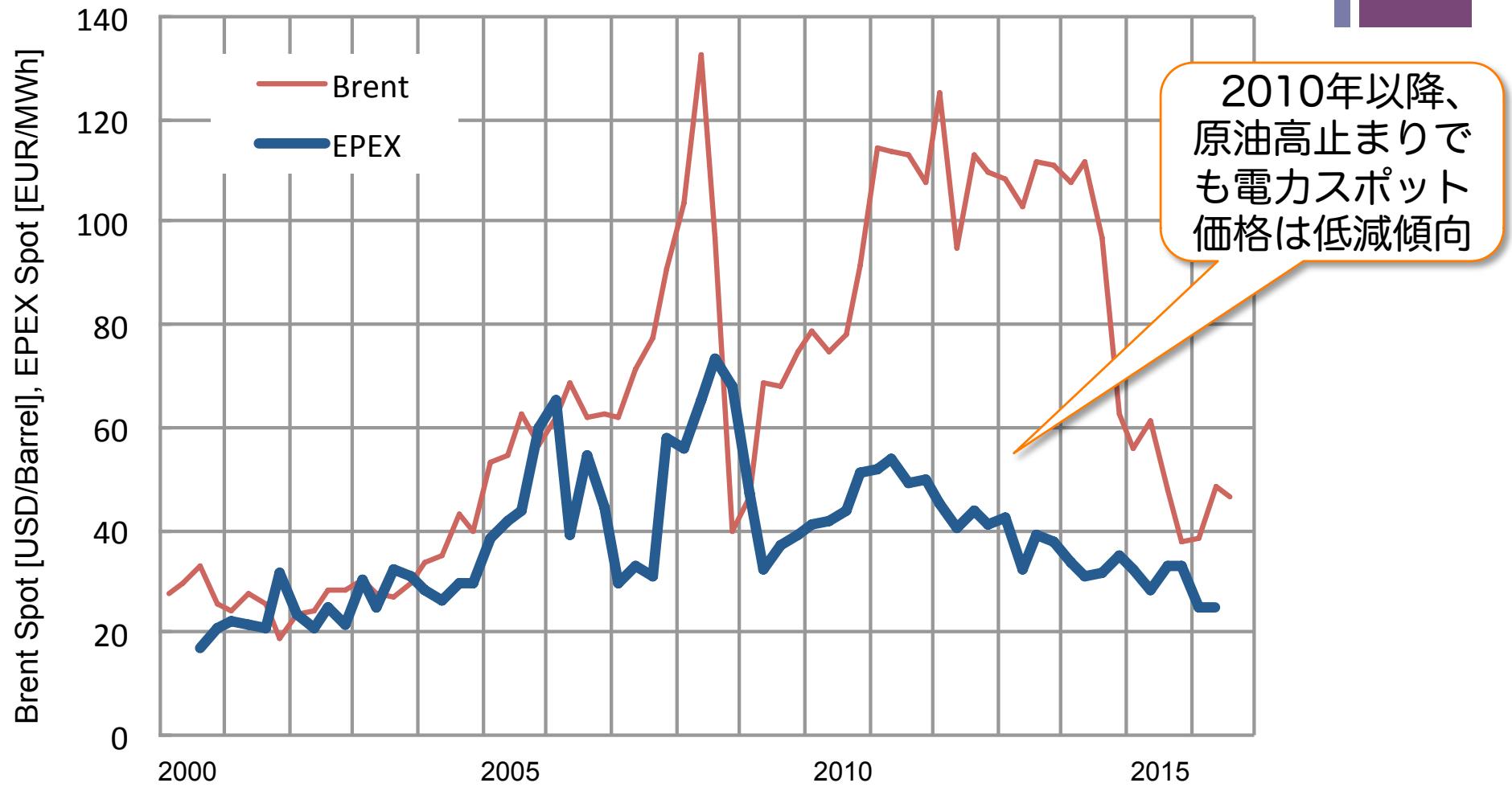
(出典) 今村・長野:「日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価」, 電中研報告 Y09027, 2009

各種電源の外部コスト



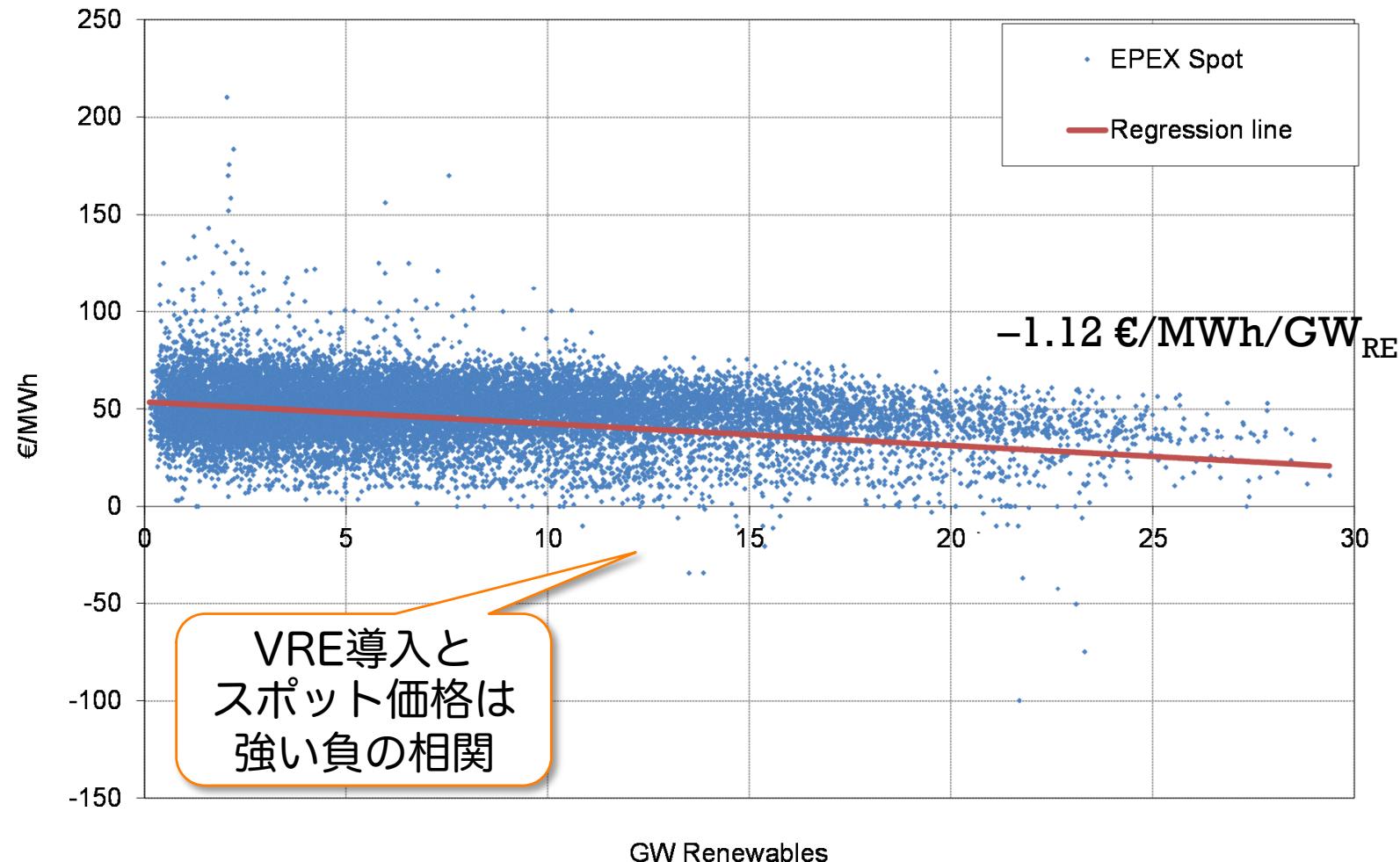
(出典) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第3作業部会:
再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書, 環境省(2012)

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大量導入とスポット価格下落

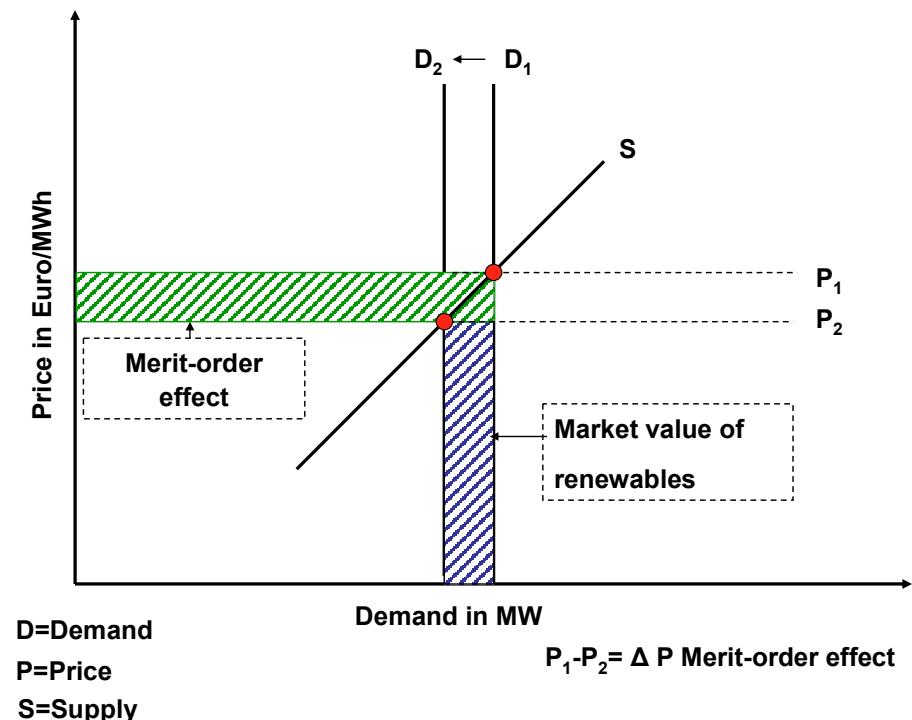


(source) J. Cludius et al: The Merit Order Effect of Wind and Photovoltaic Electricity Generation in Germany 2008-2012, Centre for Energy and Environmental Market (2013)

+ VRE大量導入とスポット価格下落

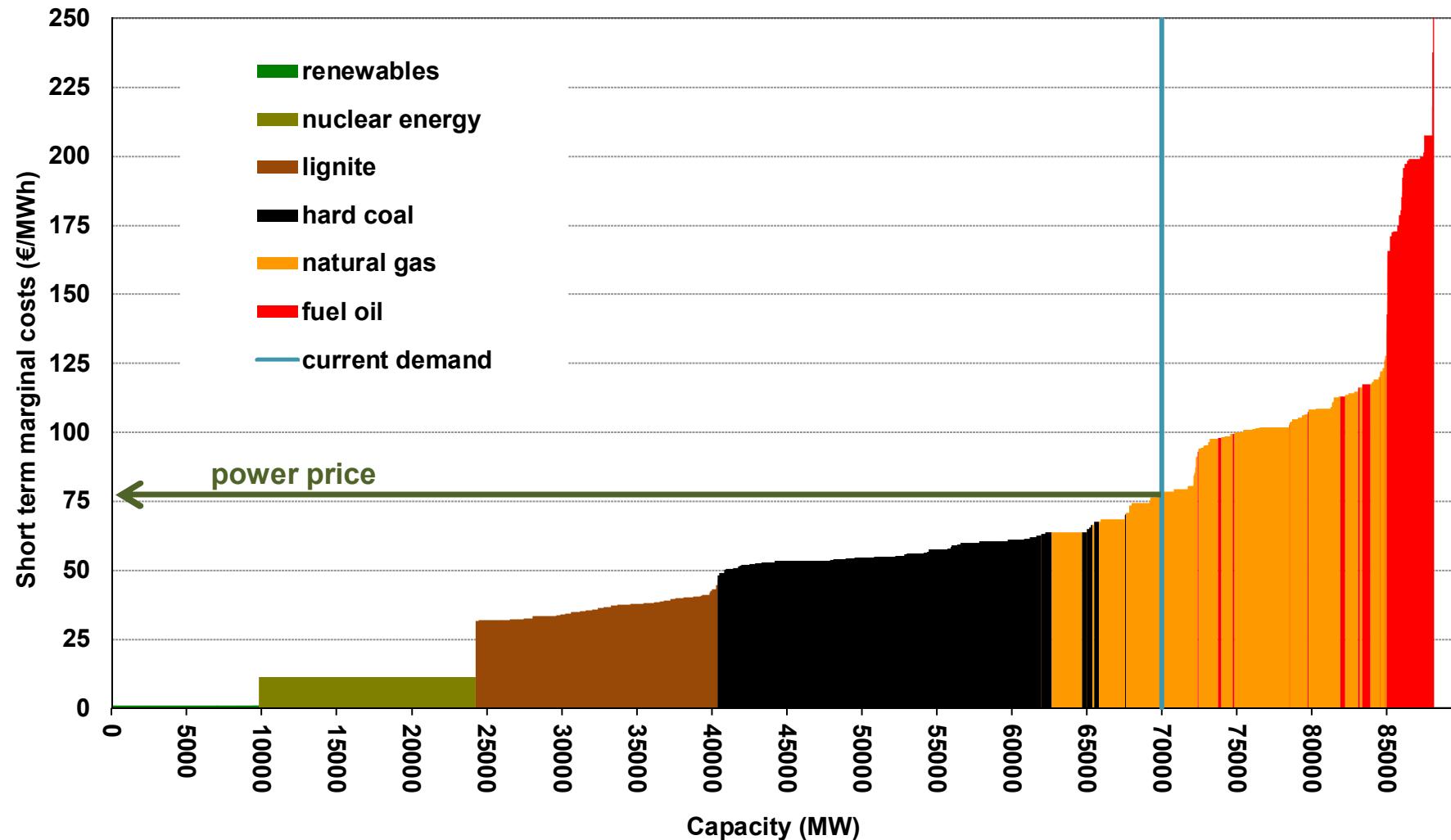
■ メリットオーダー効果 merit order effect

- 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
- 2000年代前半より理論化・
予想される
- 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

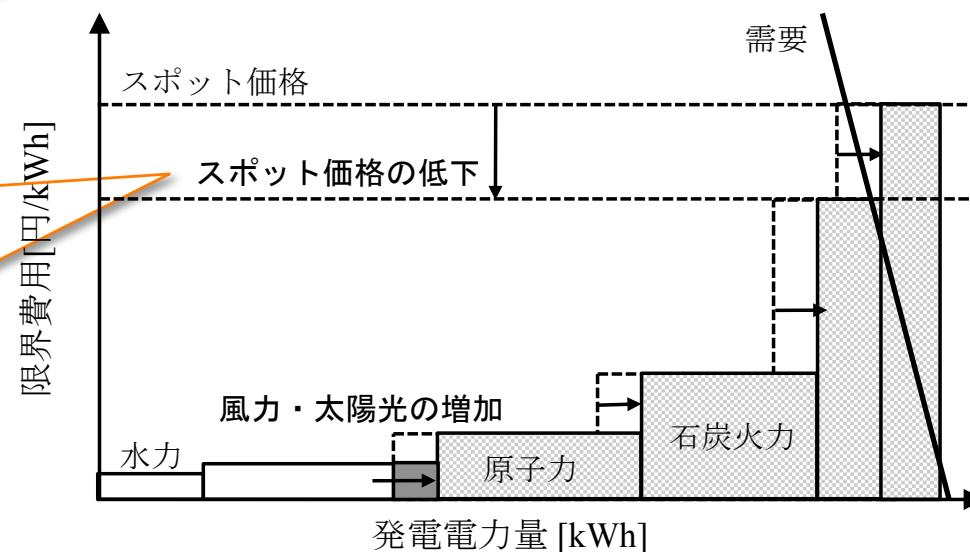
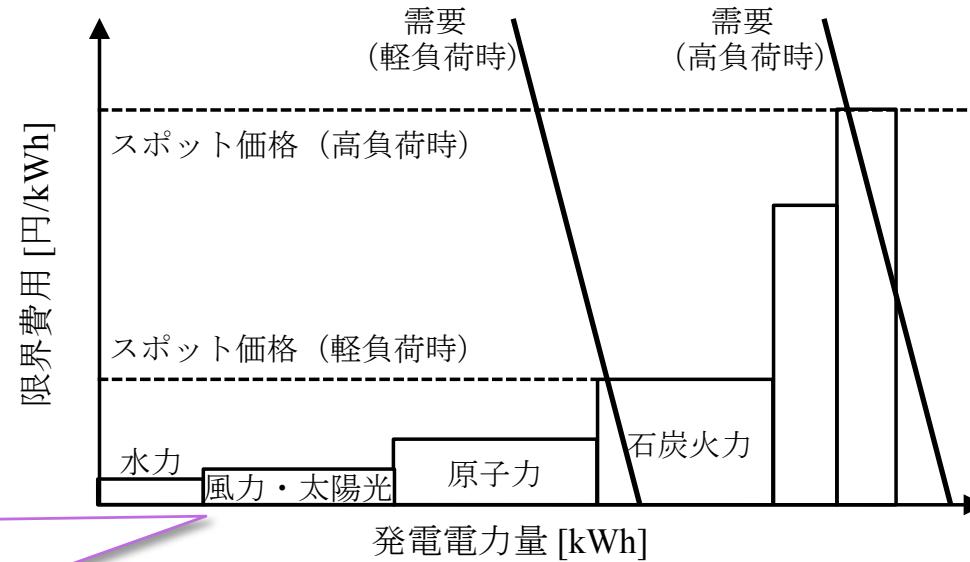


(source) J. Cludius et al: The Merit Order Effect of Wind and Photovoltaic Electricity Generation in Germany 2008-2012, Centre for Energy and Environmental Market (2013)

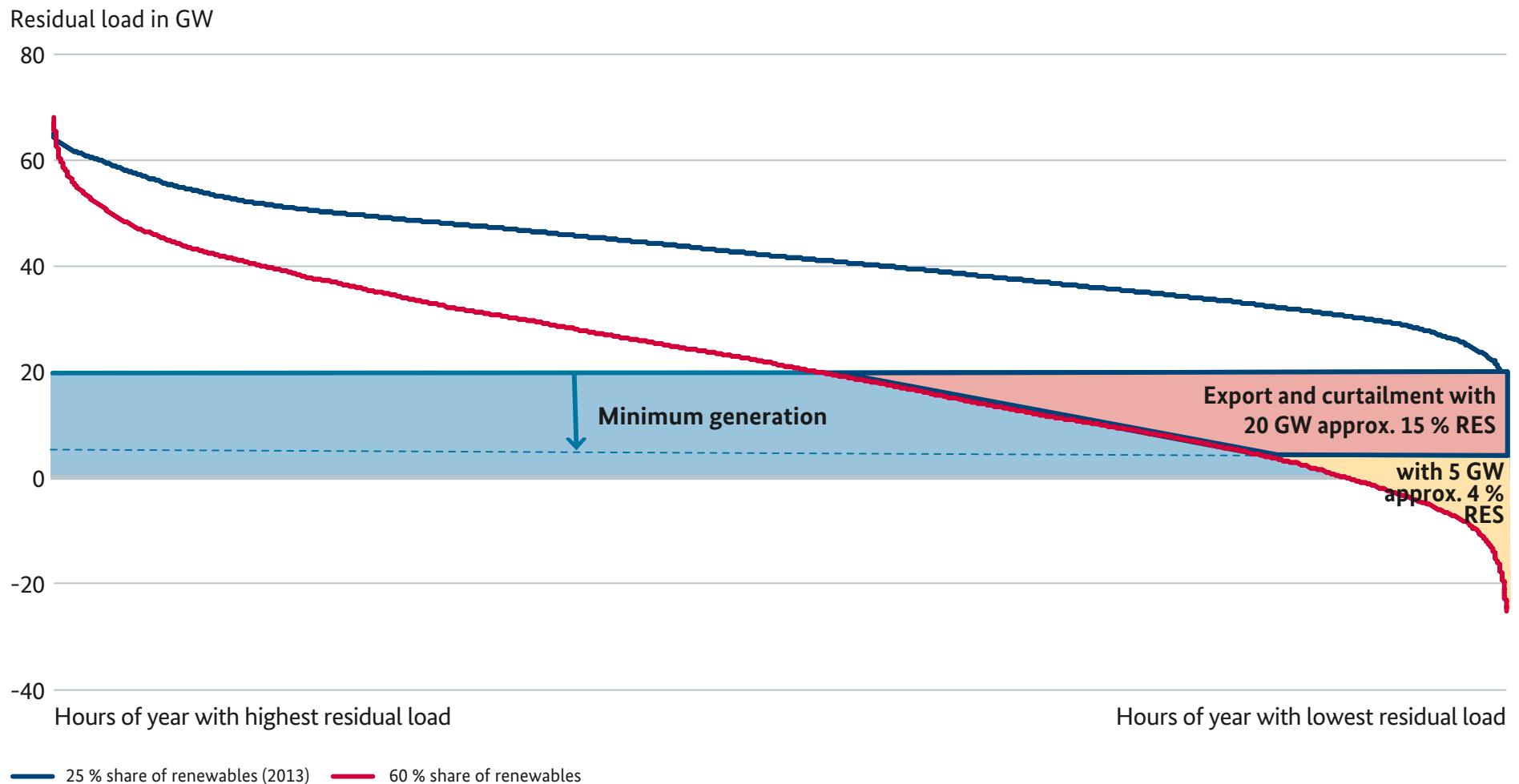
+ メリットオーダー曲線による説明

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

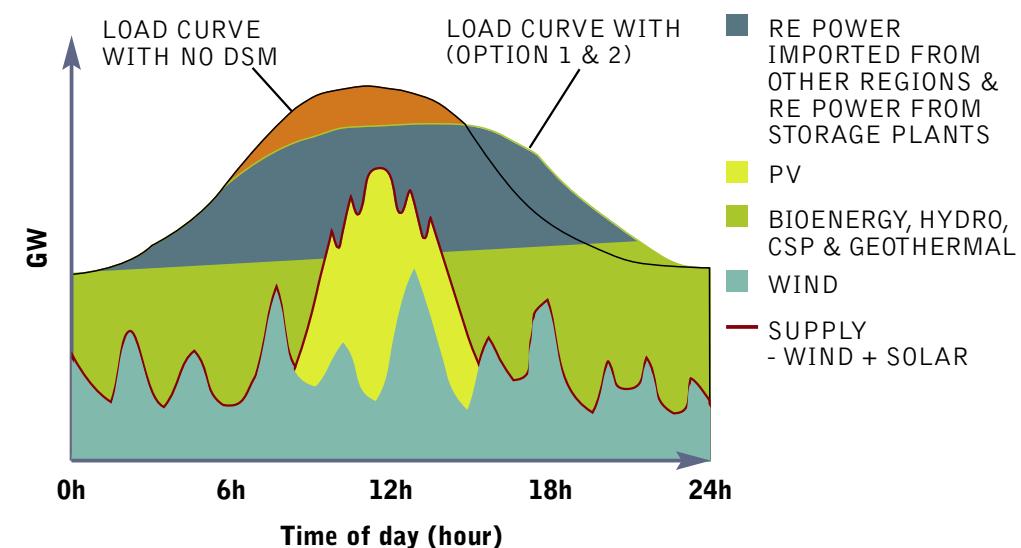
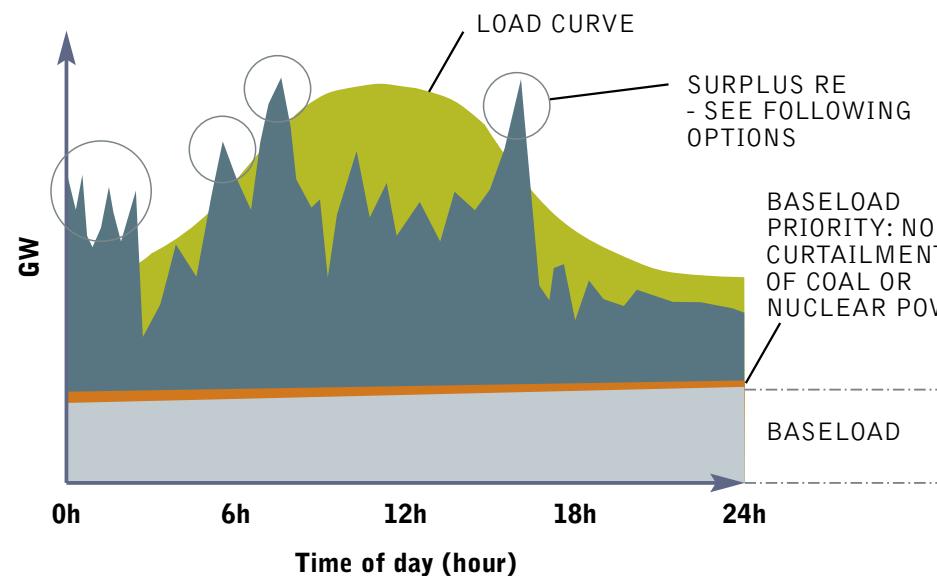
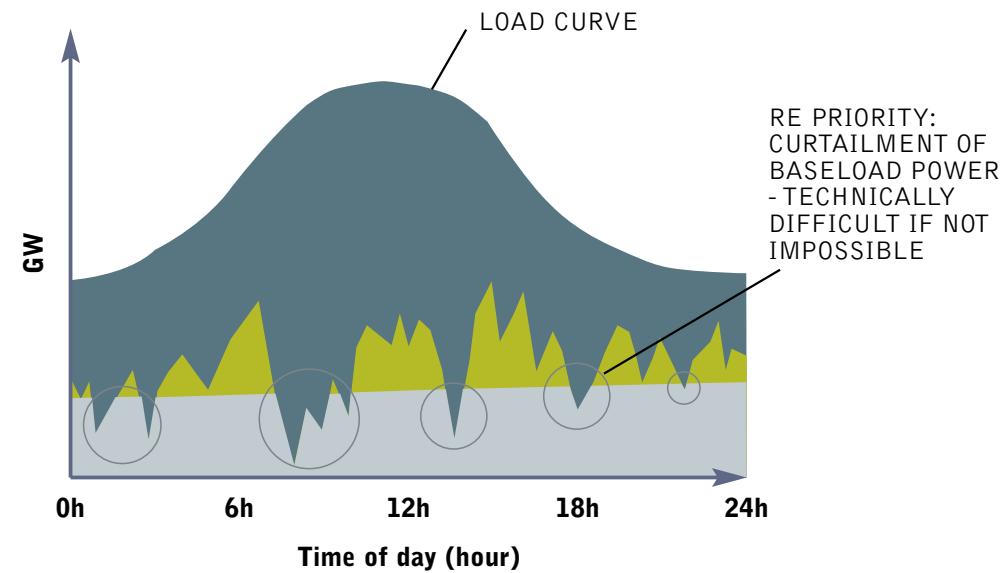
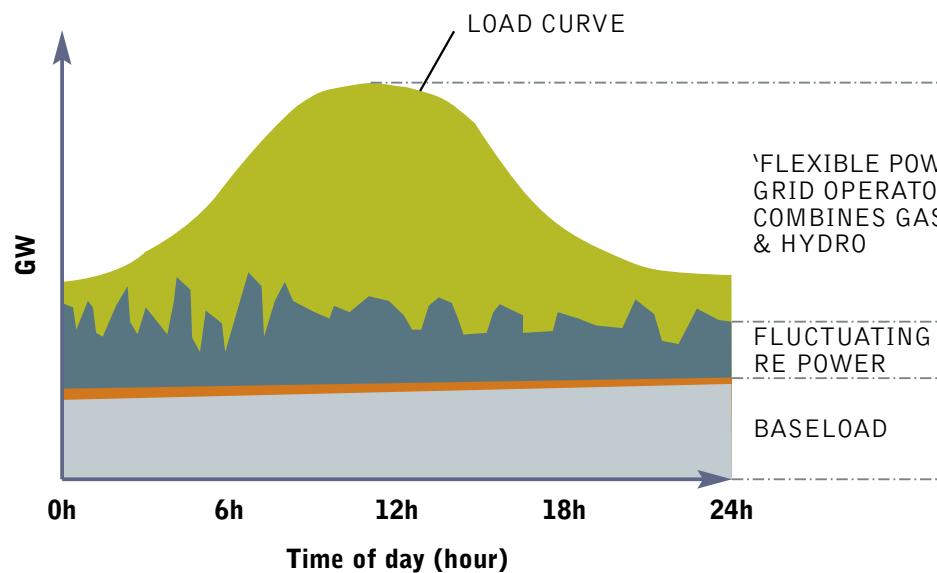


+ ベースロードの減少



(source) BMWi: An Electricity Market for Germany's Energy Transition,
White Paper by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (2015)

+ ベースロードという概念の消滅



(source) GWEC and Greenpeace: Energy [r]evolution (2013)

+ 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 (プライスキャップ、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。

+ 目 次

■ 1. はじめに

- 世界で何が議論されているか？
- VREのメリットオーダー効果と火力発電の退潮

■ 2. VRE大量導入時代の柔軟性の考え方

- 系統柔軟性の供給源
- 火力・原子力による柔軟性の供給
- 風力による柔軟性・アンシラリーの供給

■ 3. VRE大量導入時代の供給信頼度の考え方

- kW価値と容量クレジット
- 確率論的

■ 4. VRE大量導入時代の市場設計

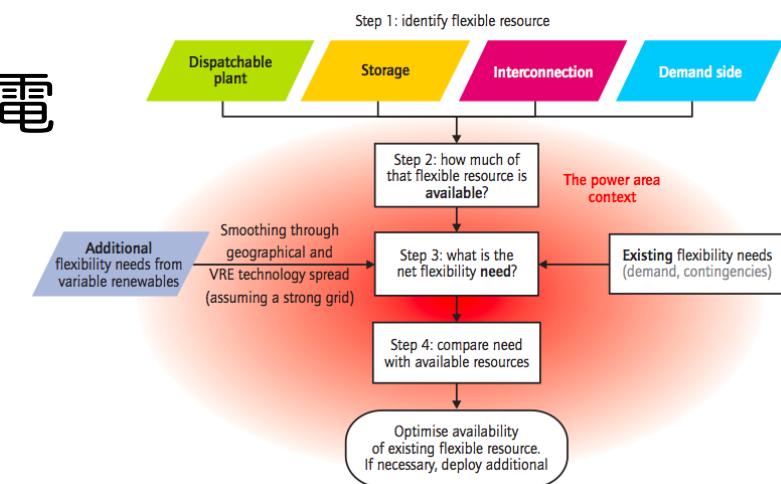
■ 5. まとめ

+ 系統柔軟性 flexibility

世界で活発に議論
(日本ではまだまだ?)

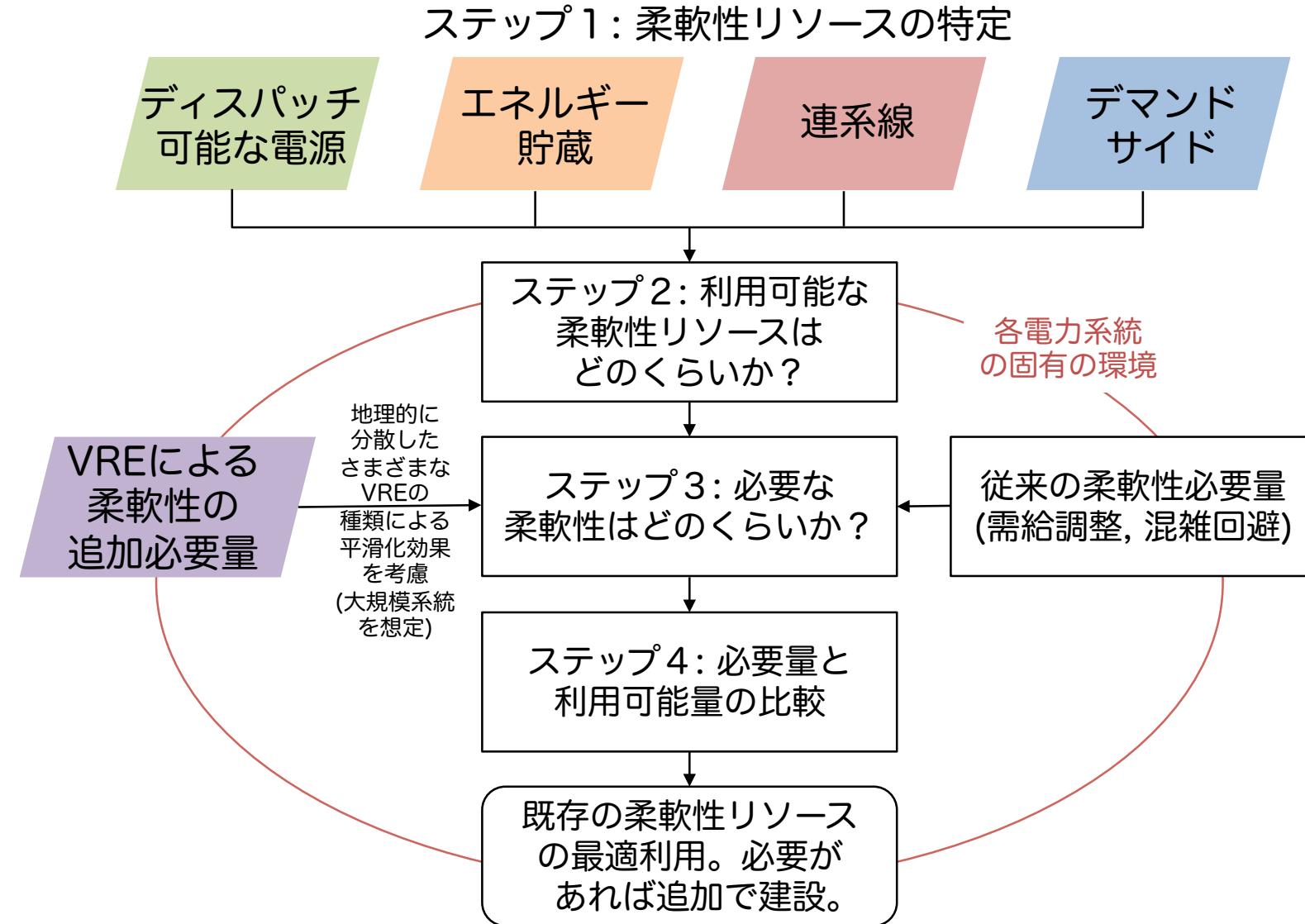
- 再エネ大量導入のための重要な指標
- 系統の変動に対応し需給バランスを維持するための能力。
 - 調整力のある電源
 - 貯水池式水力発電
 - コージェネレーション
 - コンバインドサイクルガス発電 (CCGT)
 - エネルギー貯蔵装置 (揚水発電)
 - 連系線
 - デマンドレスポンス

風力を調整するのは
火力だけではない！



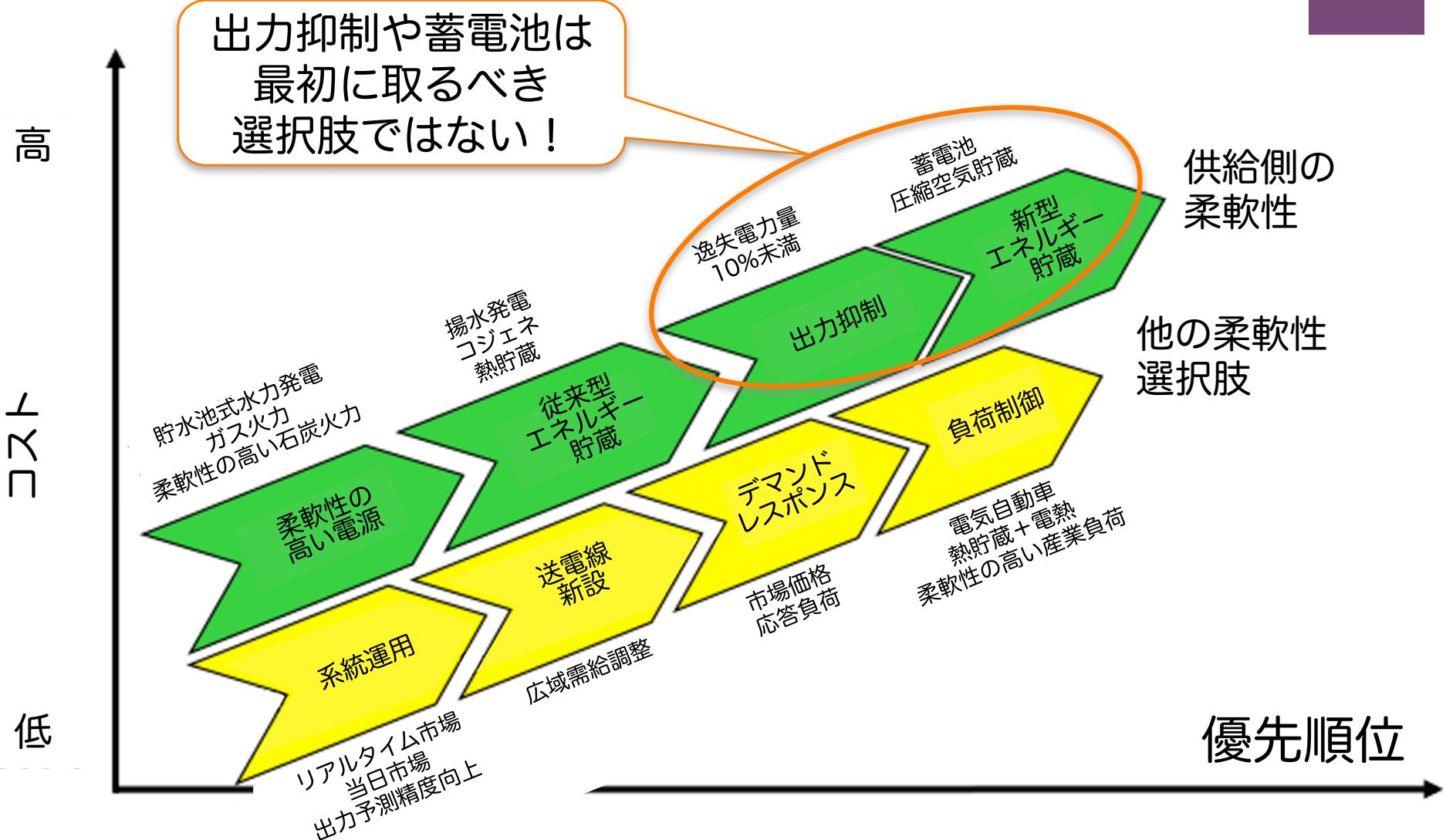
(source) IEA: Harnessing Variable Renewables (2011)

+ 合理的な系統柔軟性の選択



(出典) IEA: Harnessing Variable Renewables (2011) を筆者翻訳

+ 柔軟性リソースの優先順位



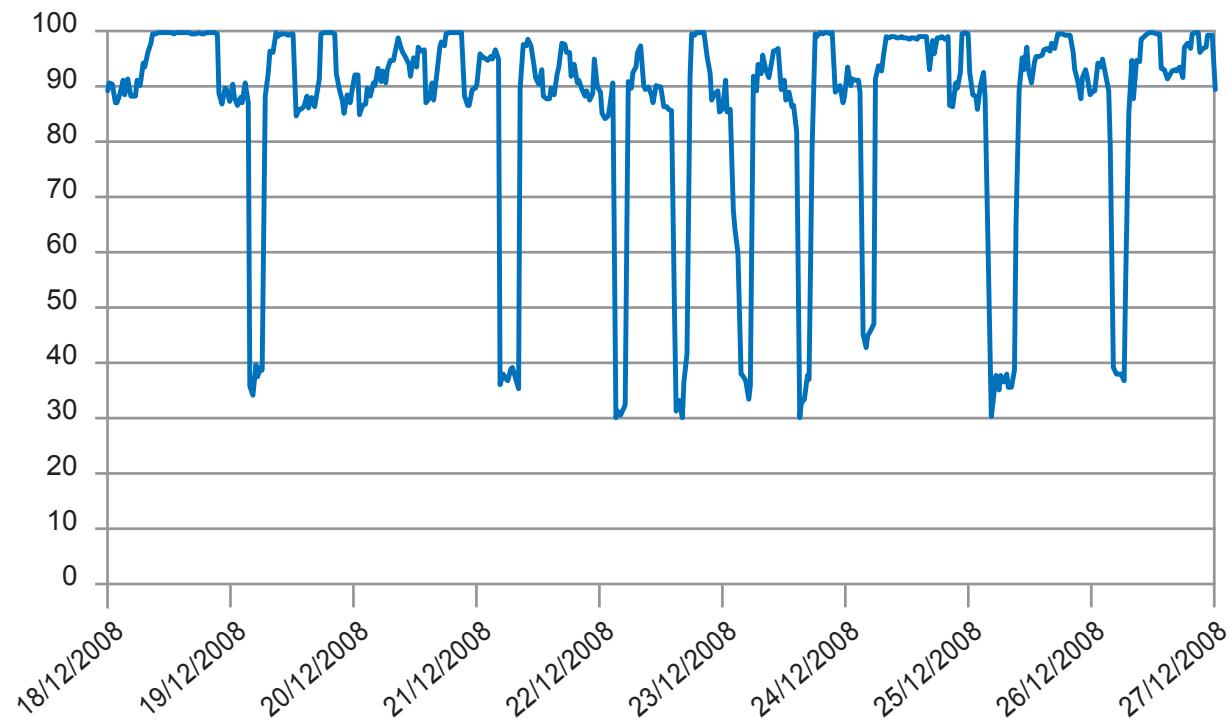
(出典) IEA Wind Task 25: "Facts Sheet" (2015) を筆者翻訳
http://www.ieawind.org/task_25/PDF/factSheets/FactSheet_1_121014.pdf

+ 火力・原子力の制御性能の向上

- 石炭火力
 - 最低負荷の低減化
 - 出力変化(ランプ)速度の高速化
- 褐炭火力 (主にドイツ)
 - 従来は一定運転しなければならないと言われていたが…
 - 高性能の最新機種も登場
- 原子力
 - フランス・ドイツ：従来から負荷追従運転
 - 日本：かつて実証試験も反対運動によりタブー視化

+ フランスの実例

- フランスでは既に原子力の負荷追従を実施
- 出力変化速度(ランプレート)は石炭火力と同等の1~5%/minという実績

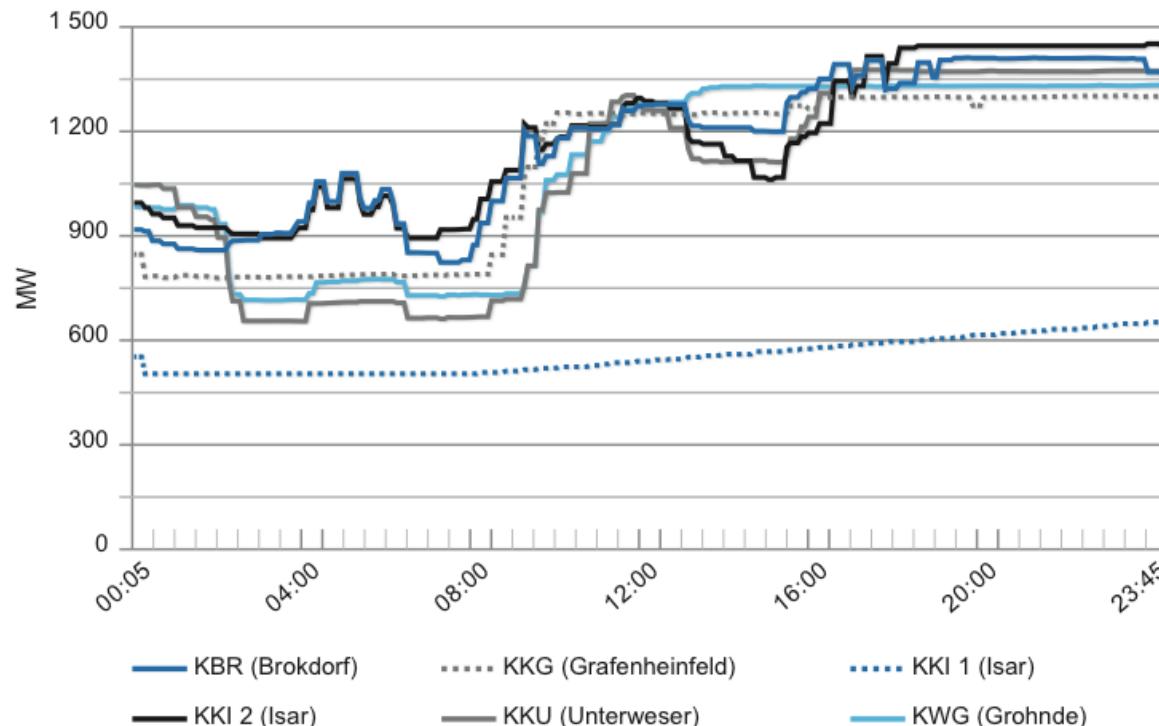


(出典) OECD Nuclear Energy Agency: "Nuclear and Renewables", 2012

+ ドイツの実例

- ドイツでは日常的に原子力が出力調整。
石炭火力も調整。近年は調整可能な褐炭も。

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

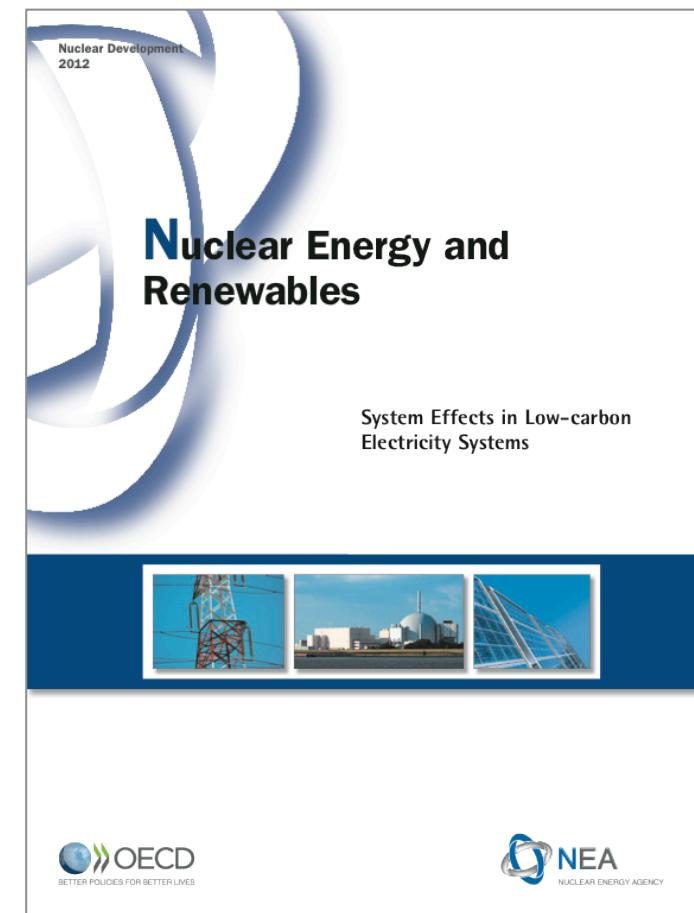


Source: Courtesy of E.ON Kernkraft, Germany.

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

+ OECD/NEAの報告書

- 経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA) 報告書
“Nuclear Energy and Renewables”, 2013
- 再生可能エネルギーの変動調整のための原子力の動的制御を検討(第3章)
- 「原子力発電の需給調整への参加なしに大量の再生可能エネルギーが導入された低炭素電力システムの将来を思い描くことはできない」(p.100)



+ 各種電源の出力変化速度

ガスタービンは
負荷追従性高い

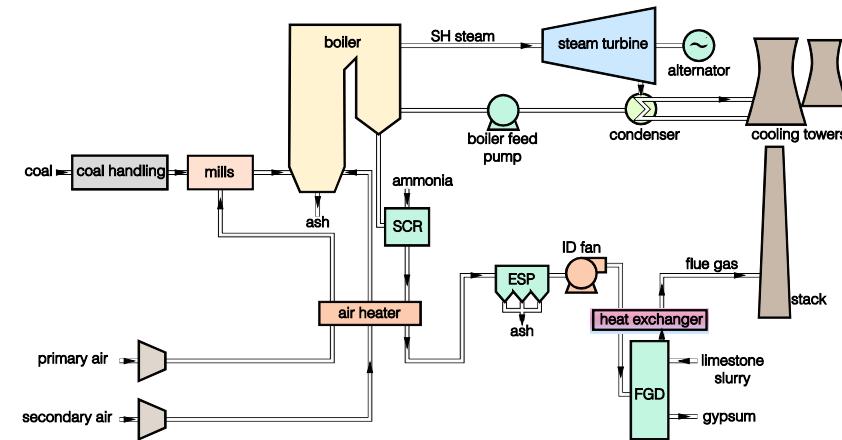
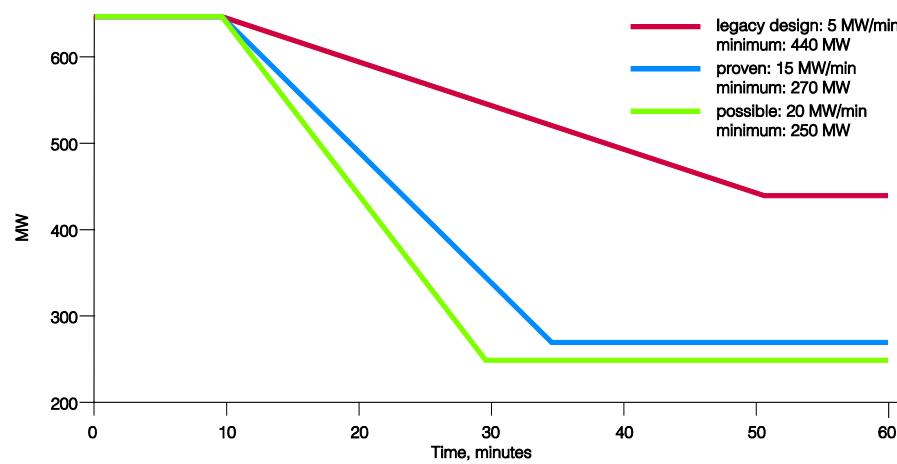
	Start-up time	Maximal change in 30 sec	Maximum ramp rate (%/min)
Open cycle gas turbine (OCGT)	10-20 min	20-30%	20%/min
Combined cycle gas turbine (CCGT)	30-60 min	10-20%	5-10%/min
Coal plant	1-10 hours	5-10%	1-5%/min
Nuclear power plant	2 hours - 2 days	up to 5%	1-5%/min

原子力も実は
石炭並みに制御可能

+ 石炭火力の柔軟性向上

Table 5 Flexibility capabilities of coal-fired units (Reischke, 2012)

	State of the art:	Development (new and existing plants):
Start-up:	2–6 hours depending on starting condition	1–4 hours depending on starting condition
Minimum load (hard coal)	New power plants: 25% Existing power plants: 40%	Conventional firing 15–20% Indirect firing 10–15%
Minimum load (Brown coal)	New power plants: 40% Existing power plants: 50%	Conventional firing 35–40% Indirect firing 10–15%
Load change cycles	Moderate	High to very high
(Primary frequency control)	2–5%/30 s possible to 5%/30 s	10%/10 s
(Secondary frequency control)	2-/min	10%/min
Biomass	10% cofiring	100% biomass



(出典) IEA Clean Coal Centre: "Increasing the flexibility of coal-fired power plants" , 2014

+ 風力発電の柔軟性供給能力

■ Was:

日本では未だにこの考え方が主流

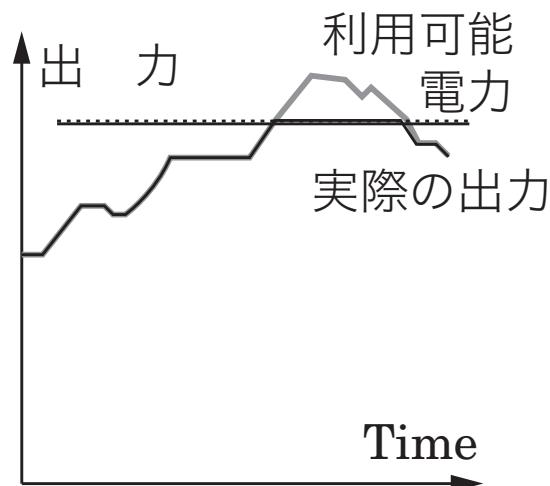
- 「不安定電源でバックアップが必要」
- 予測できない。信頼性がない。
- non-dispatchable

■ Now:

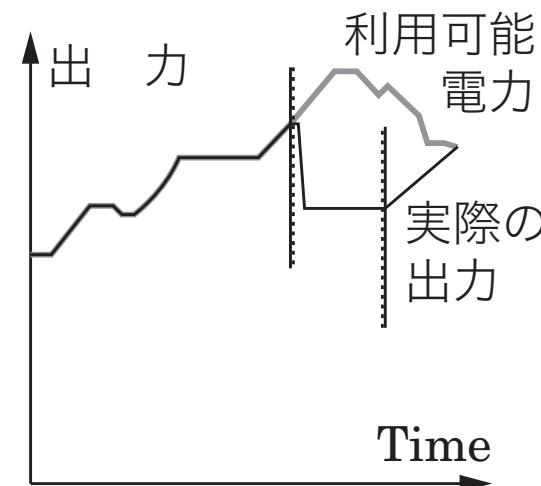
欧米では2000年代後半よりイノベーションが進む

- 自然変動電源だが、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。

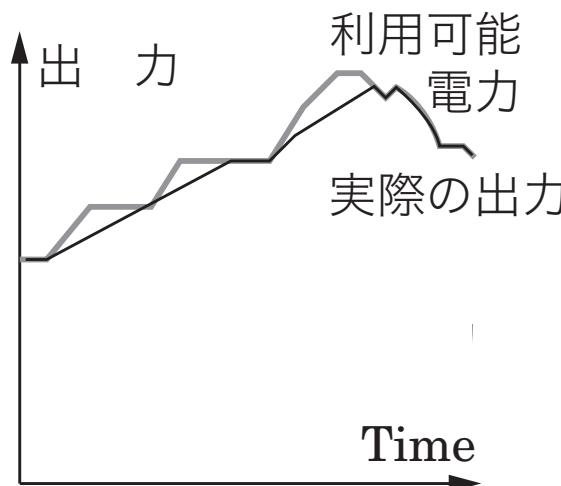
+ 風力発電所の系統運用への貢献



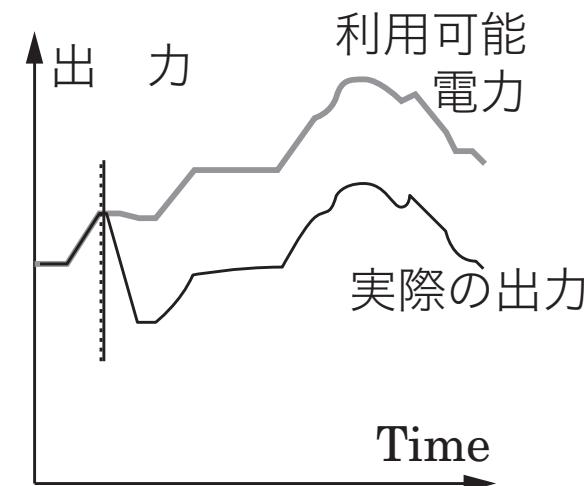
(a) 出力抑制



(b) 需給バランス制御



(c) ランプ制御



(d) デルタ制御

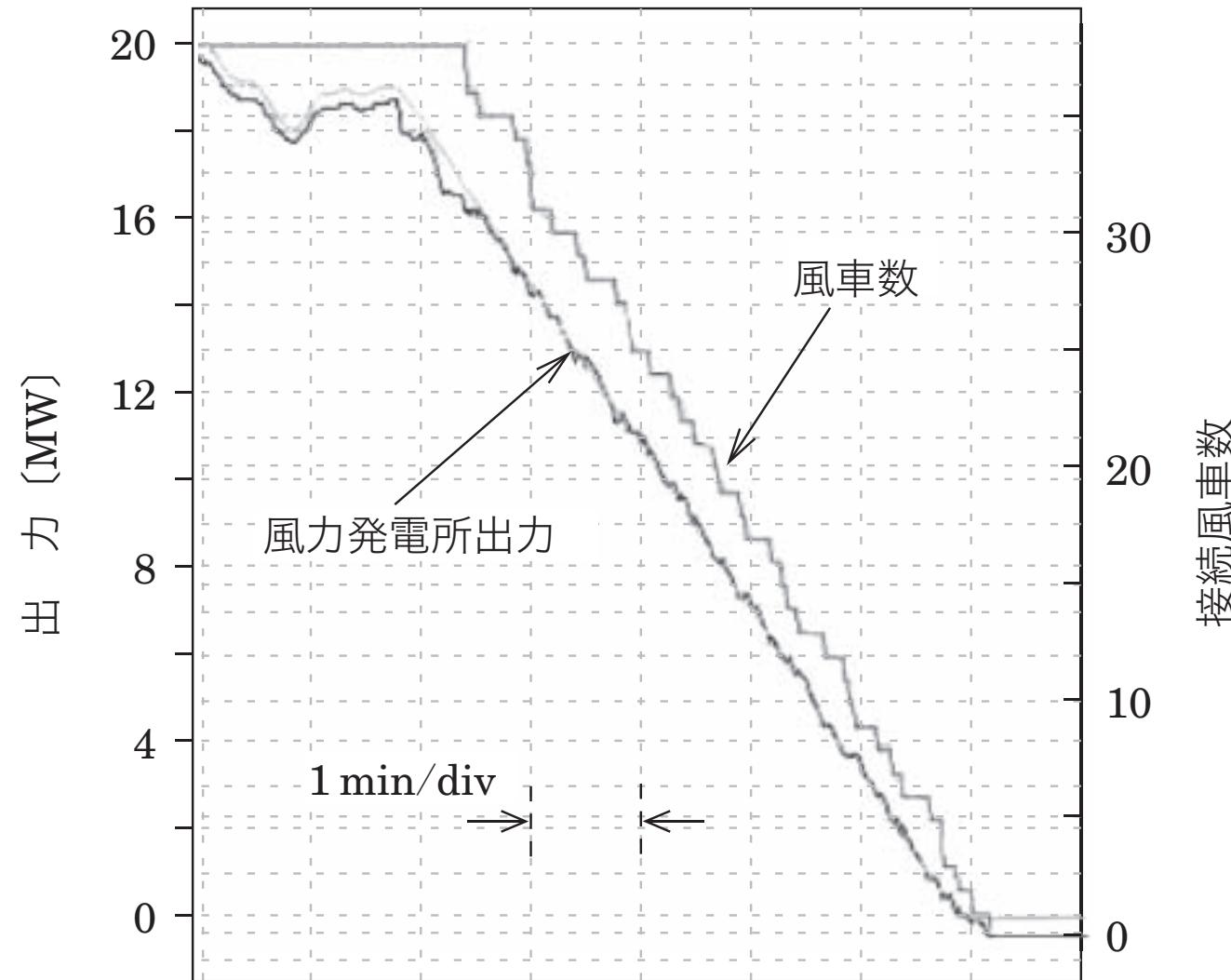
+ 風力発電所の系統運用への貢献 (有効電力制御)

- いくつかのメーカーから提案されている最新型の有効電力制御では、系統に関する性能目標を達成するために風車および風力発電所の電気的出力を管理することができる。
- ピッチ制御や、タイプIIIやIVの風車の場合にはコンバータの制御によって有効電力を調整する風車の能力は、系統運用に大きく影響を与えていている。
- 風力発電を出力抑制することにより系統にアンシラリーを提供する機会を提供することが可能となる。
- 風力発電所で出力抑制が可能であると、**風力発電所を自動発電制御(AGC)に組み込むことも可能となる**。近年、いくつかの風力発電所がAGC給電指令により運用されている。

+ 風力発電所の系統運用への貢献 (ガバナ応答制御)

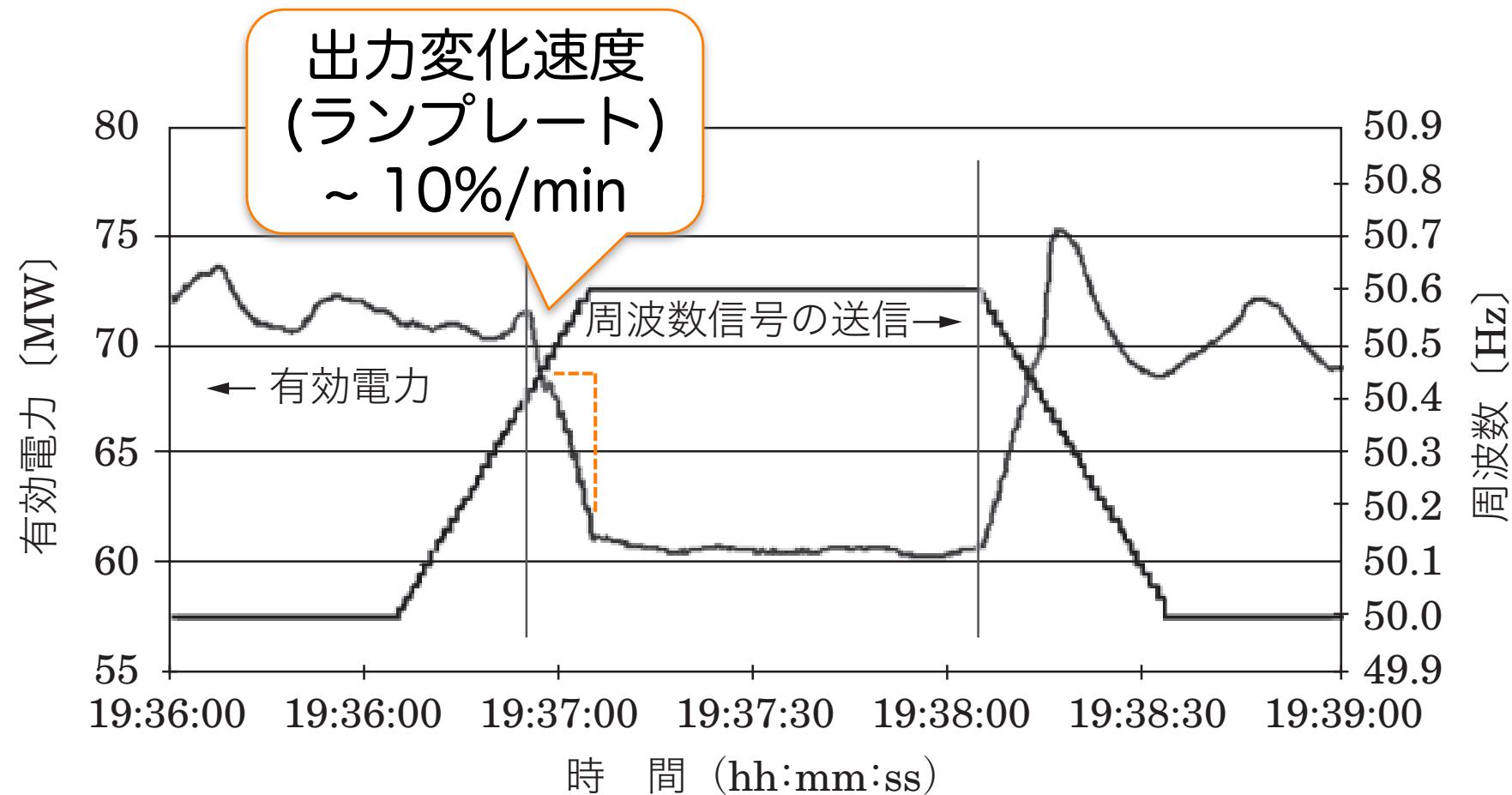
- DFIGおよびフル定格コンバータをもつ風車の多くは、系統周波数の変動に対してリアルタイムで出力を調整する能力をもっている。
- 系統が公称周波数のときに風車が出力可能な電力以下で運転していれば、系統周波数が不感帯より低下した際に出力を上げることも可能である。したがって、(中略) 風車も系統に対して瞬動予備力として貢献することも可能である。
- 慣性応答をもつ風車がいくつかのメーカーから提供されている。ガバナ応答とは異なり、慣性応答はより高速で過渡的な性質をもつ。したがって、この特性を用いることで発電電力量が制限されるという不利益は発生しない。

+ 風力発電所の緊急停止試験 (GE Energy)



(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

+ 風力発電所の周波数応答試験 (Siemens Wind)

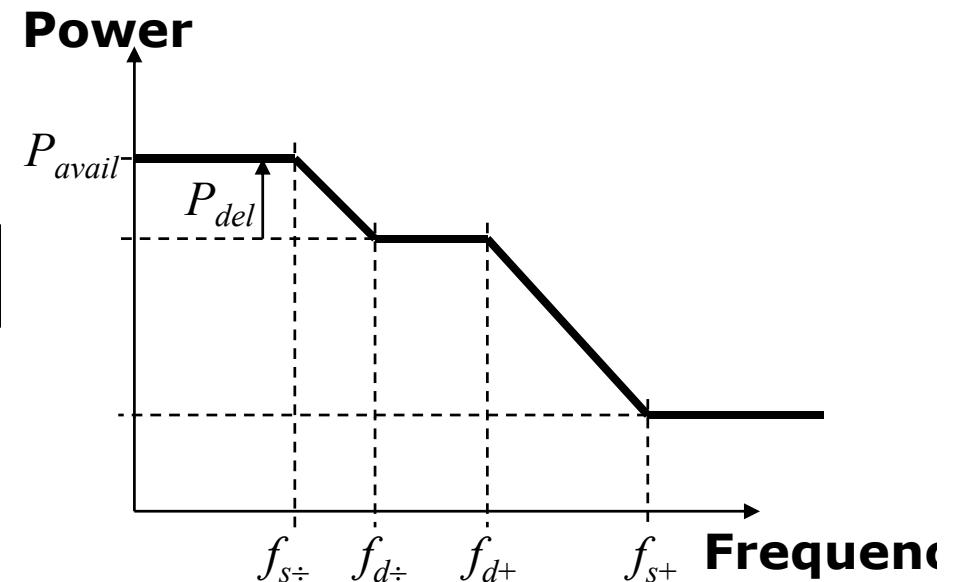
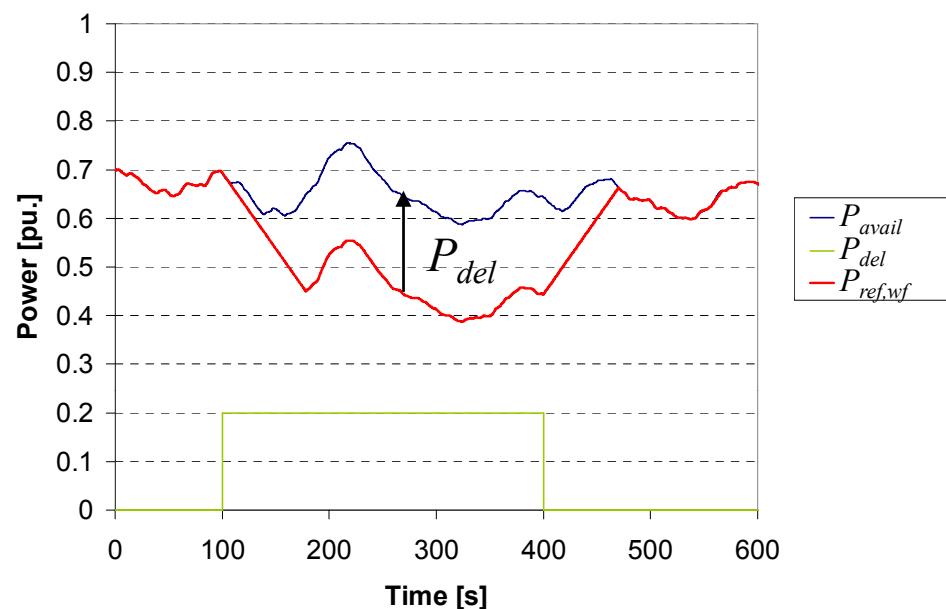


(出典) Ackermann編著: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社 (2013) 第40章

+ デルタ制御試験 (デンマーク)

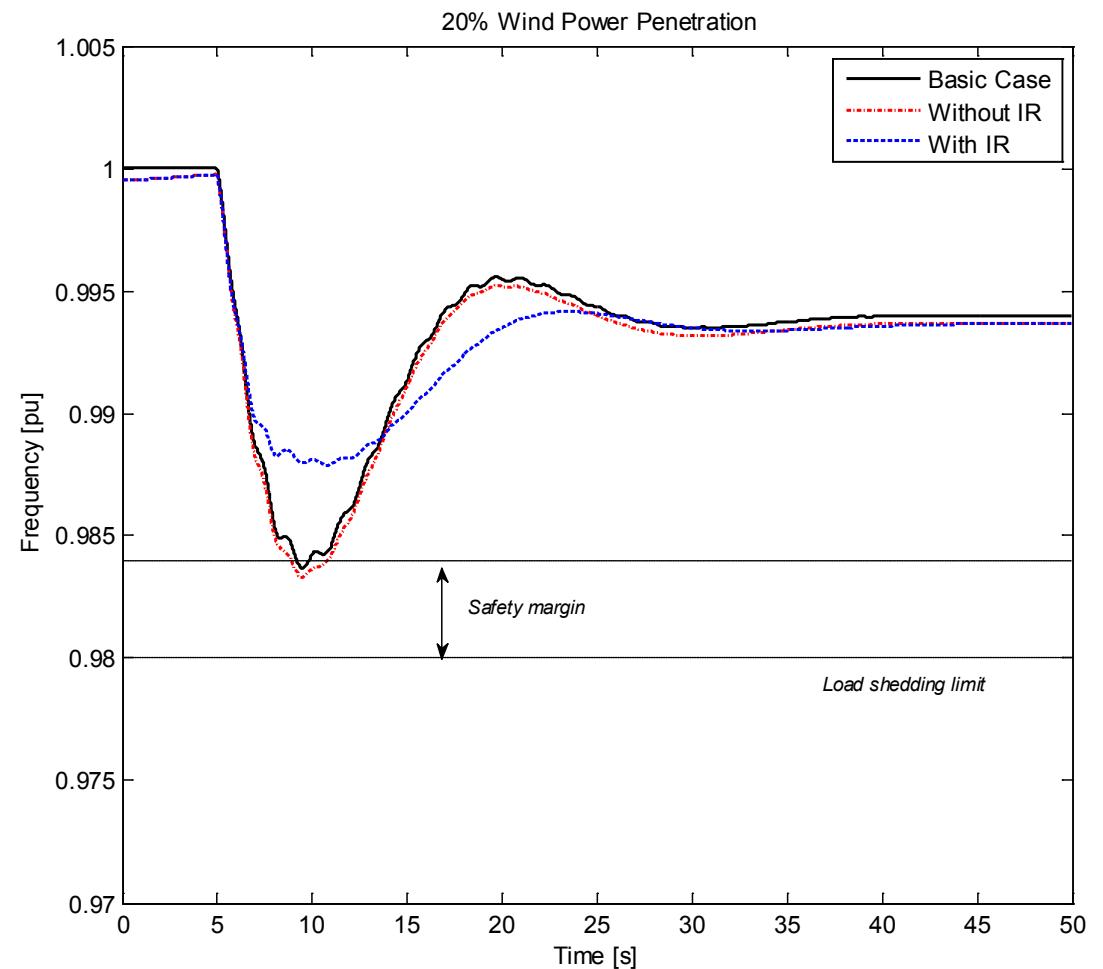
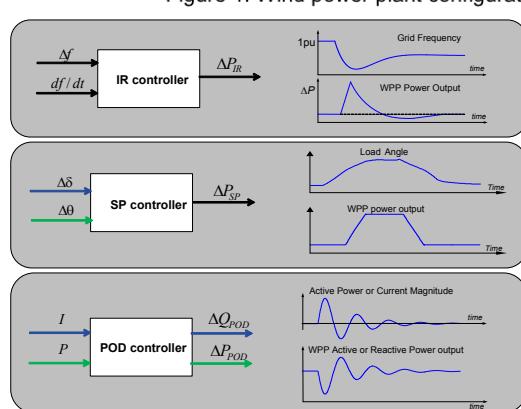
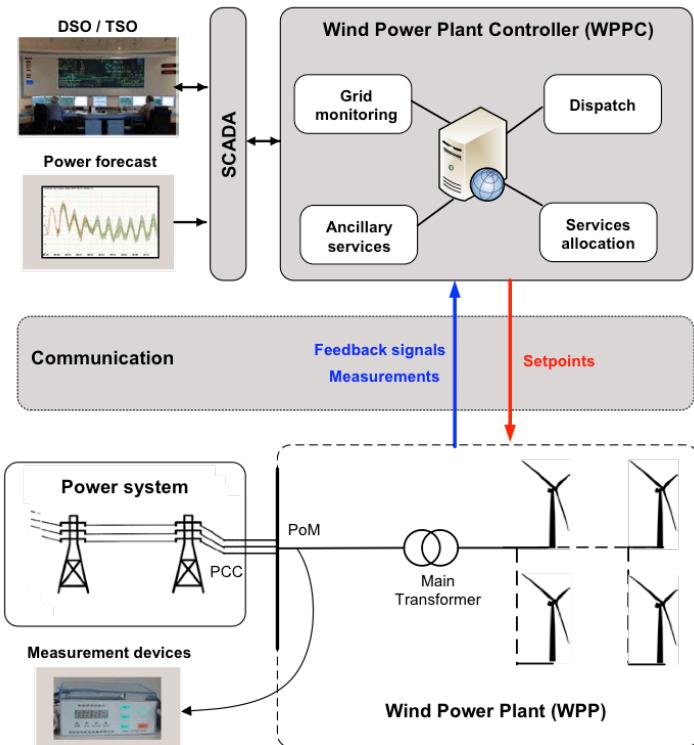
周波数調定率制御

- 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)

+ 疑似慣性模擬試驗 (Risø-DTU)



(出典) A. Hansen and M. Altin: Impact of advanced wind power ancillary services on power system, DTU Wind Energy Report 2015



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。

+ 目 次

■ 1. はじめに

- 世界で何が議論されているか？
- VREのメリットオーダー効果と火力発電の退潮

■ 2. VRE大量導入時代の柔軟性の考え方

- 系統柔軟性の供給源
- 火力・原子力による柔軟性の供給
- 風力による柔軟性・アンシラリーの供給

■ 3. VRE大量導入時代の供給信頼度の考え方

- kW価値と容量クレジット
- N-1基準

■ 4. VRE大量導入時代の市場設計

■ 5. まとめ

+ 供給信頼度と系統安定度

■ 供給信頼度 **reliability**

- ✓ 停電の発生頻度、継続時間、発生範囲によって表される電力供給の信頼性。(電気事業連合会による定義)
- ✓ 電力系統の信頼度はアデカシーとセキュリティの2つの基本的な側面を考慮することにより説明できる。

■ 系統安定度 **stability**

- ✓ 発電された電力と使用される電力のバランスが事故などによって崩れた場合、バランスがとれた状態に収束する力のこと。(電気事業連合会による定義)



供給信頼度における2つの概念

■ アデカシー adequacy

- 想定された状況すなわち系統設備すべて健全な状態および N-1 状態において、設備がその容量以内、系統電圧が許容値以内となること。

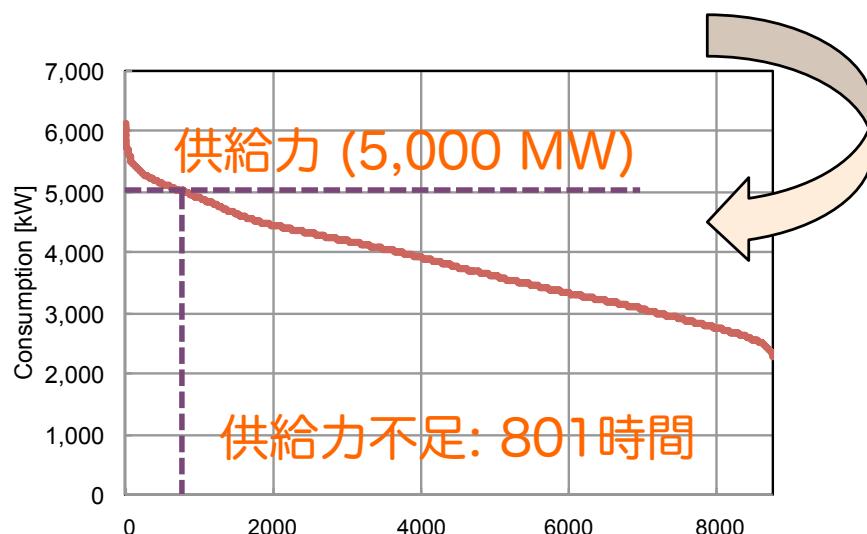
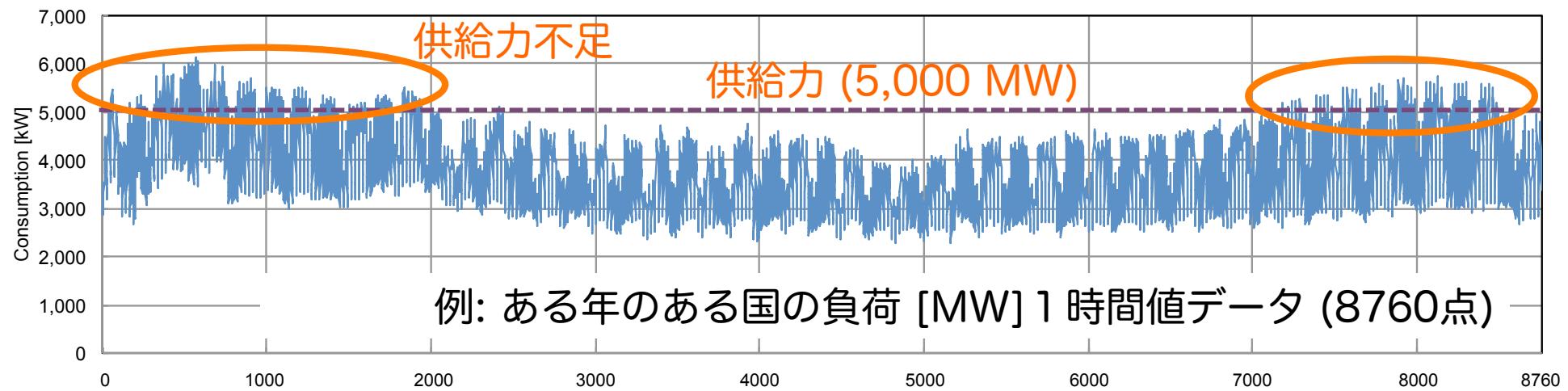
■ N-1基準: 電力系統設備の一構成要素が事故で停止 (N-1) した場合にも停電や電源停止などの影響が基本的に発生しないという設備形式の考え方。

■ セキュリティ security

- 想定された事故に対し、電力系統が動的な状態を含め供給を維持できること。

+ 供給信頼度の考え方

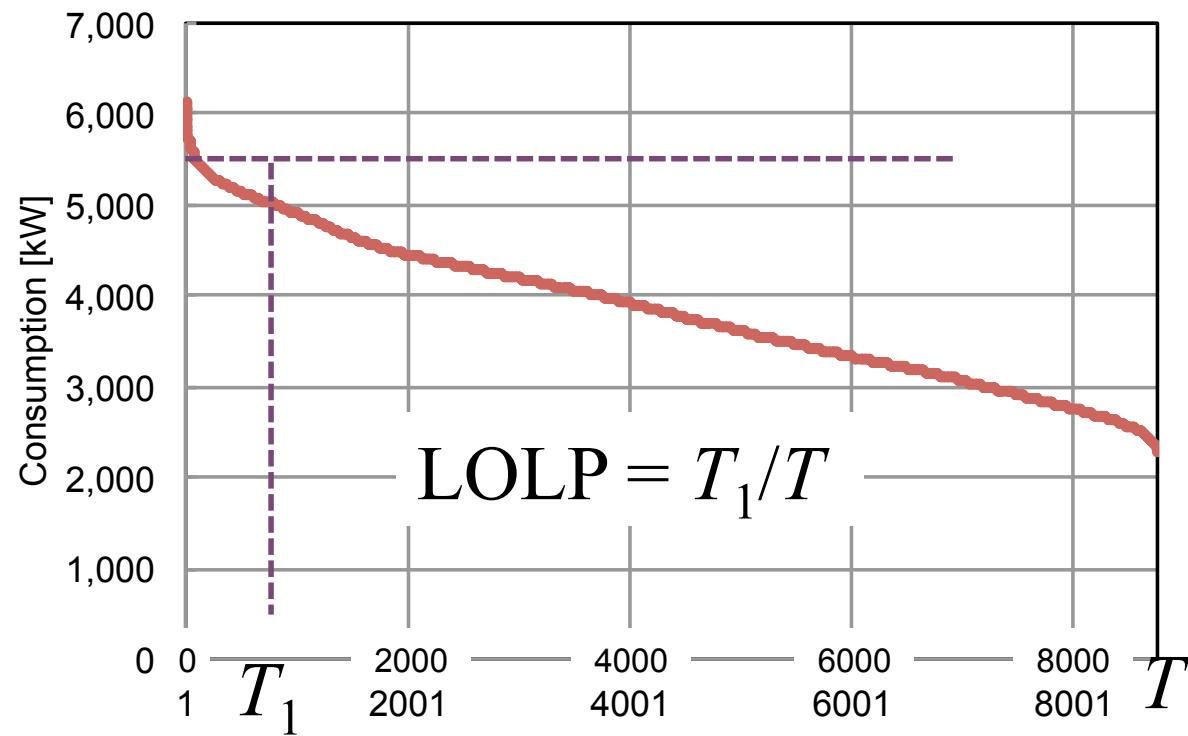
■ 年間負荷時系列データから持続曲線を作成



- 持続曲線 **duration curve**
- 年間負荷時系列データ(8760点)を降順に並び替え

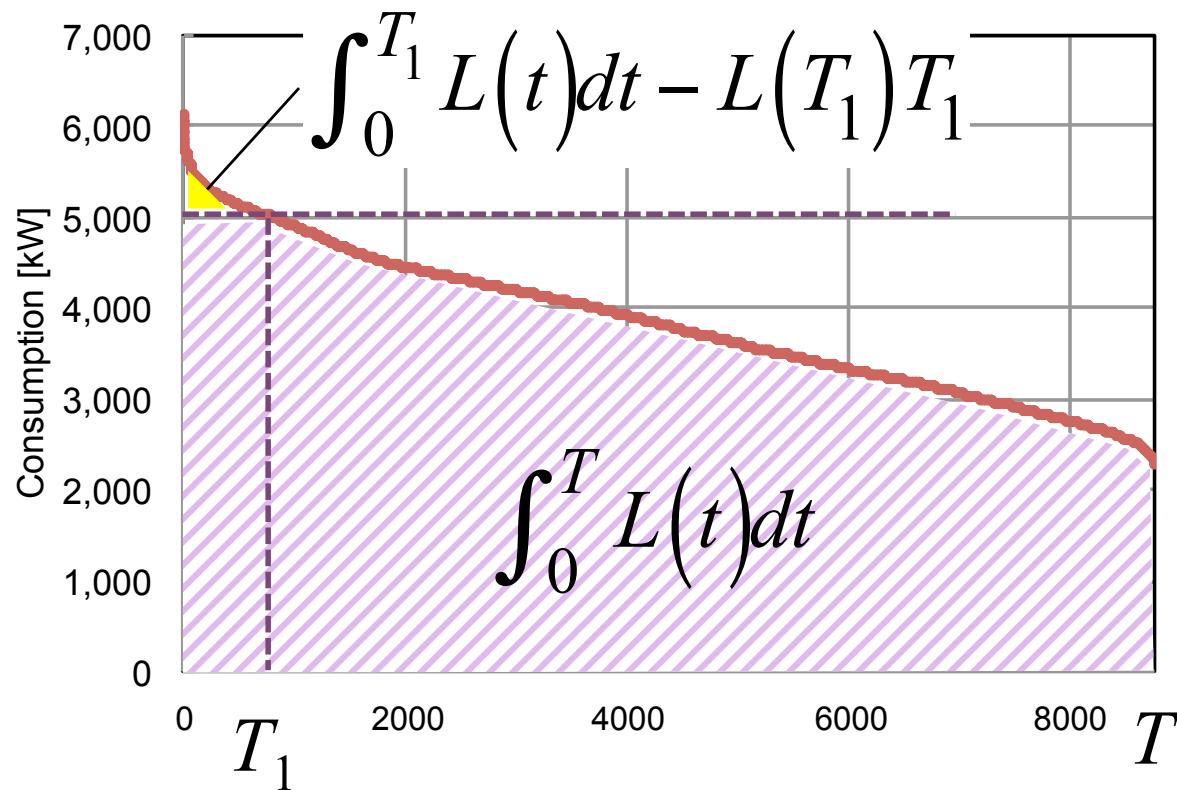
+ 持続曲線とLOLP, LOEP

- 電力不足確率 **LOLP: Loss of Load Probability**
 - 年間暦時間に占める電力不足時間の割合



+ 持続曲線とLOLP, LOEP

- 電力量不足確率 **LOEP: Loss of Energy Probability**
- 年間消費電力量に占める不足電力量の割合



$$\text{LOEP} = \frac{\int_0^{T_1} L(t)dt - L(T_1)T_1}{\int_0^T L(t)dt}$$

+ VREのkW価値と容量クレジット

■ 日本での議論 (kW価値)

■ L5法による算出

- 流れ込み式水力発電などで古典的に用いられる。
- 一ヶ月分の同時刻発電電力量の最低5日平均から電源価値を算出

■ K90法による算出

- 時間確率90%で評価

■ 海外での議論 (容量クレジット)

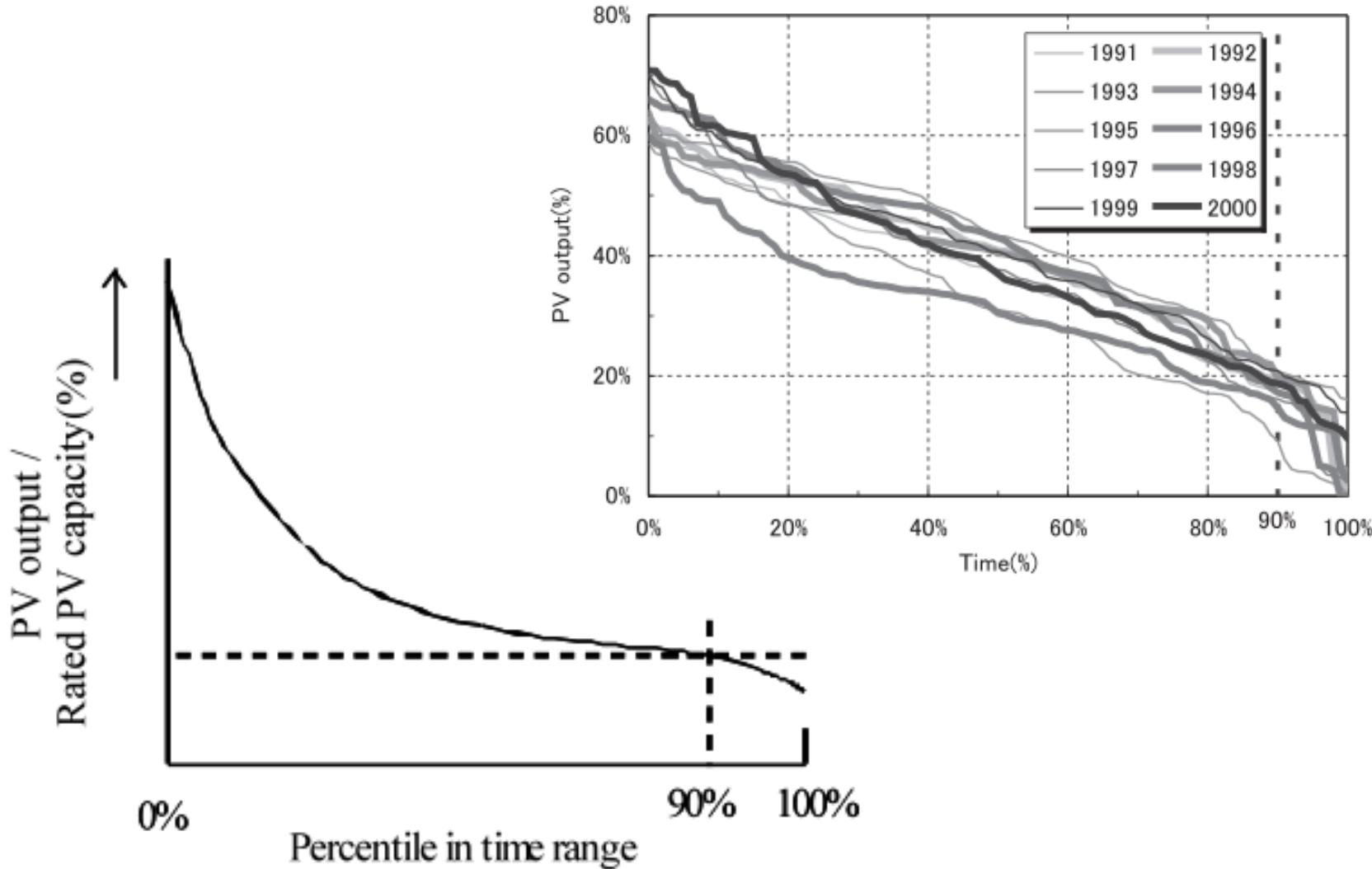
■ ELCCによる算出

- 供給信頼度対応能力 ELCC: effective load carrying capability
- 再生可能エネルギー電源を導入した場合と同等の供給信頼度を有する在来型電源の容量を求め、その比較対象の在来型電源の設備容量と風力発電の設備容量の比率により、容量クレジットを算出する手法。

■ 残余需要 (= 需要 - VRE出力) を考慮

一般に、
 $L5 < K90 << ELCC$

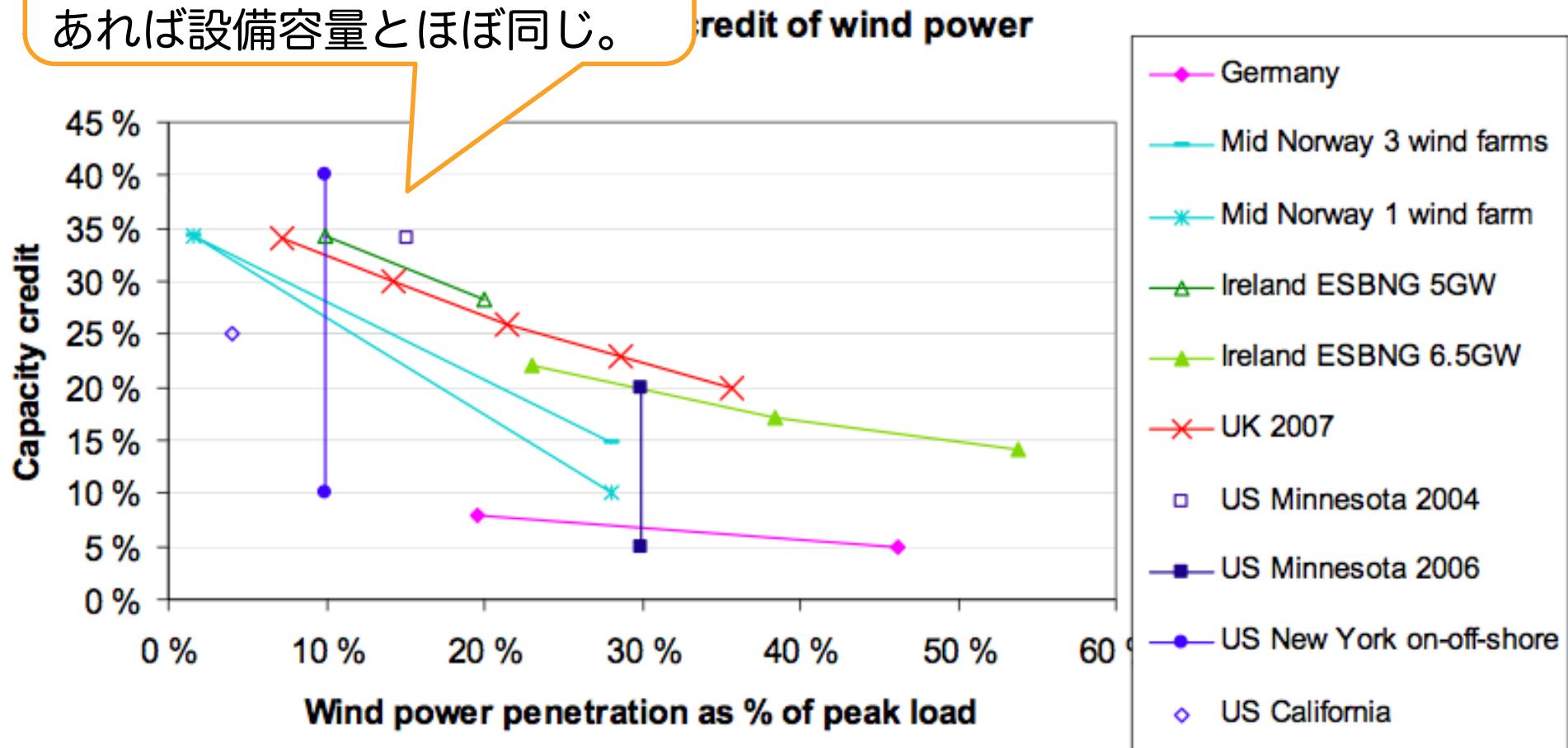
+ K90手法の例



(出典) 宮崎, 山地他: 住宅設置太陽光発電データ分析によるkW価値の評価,
電学論B, Vol.124, No.11, pp.1293-1299 (2014)

+ ELCCによる容量クレジット

風力発電の容量クレジットは、導入率が20%未満であれば設備容量とほぼ同じ。



(出典) IEA Task25: 第1期最終報告書, 日本電機工業会, 2012
<http://jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/shiryo.html>

+ N-1基準の取り扱い

■ 日本

- 決定論的考え方。（国民感情にも起因？）
- いかなる時間帯でもN-1基準違反は許容されない。
- N-2基準が適用される場合も(?)

■ 欧州 (ENTSO-E)

- 確率論的考え方。
- ないことが望ましいが、違反事象は警告レベル。
(4段階の下から2番目の“Scale1”レベル)
- 2013年は73件。 (Scale1は133件)
- 2014年は45件。 (Scale1は220件)

+ ENTSO-EのN-1違反の位置づけ

計1035件

計220件

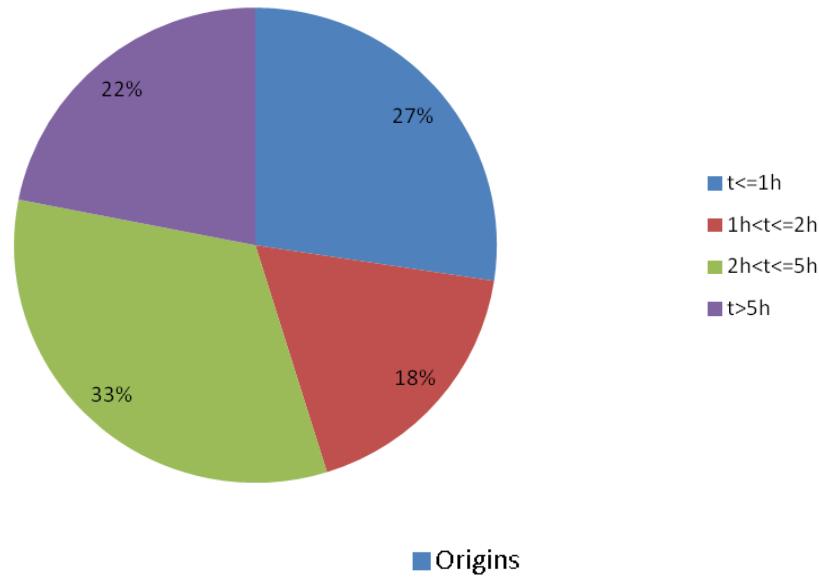
計4件

Scale 0	Scale 1	Scale 2	Scale 3
Events on load (L0) 21件	Events on load (L1) 11件	Events on load (L2) 4件	Blackout State (OB3)
Disturbance leading to frequency degradation (F0) 5件	Disturbance leading to frequency degradation (F1)	Disturbance leading to frequency degradation (F2)	0件
Disturbance on Transmission Network equipment (T0) 820件	Disturbance on Transmission Network equipment (T1) 120件	Disturbance on Transmission Network equipment (T2)	
Disturbances on generation facilities (G0) 129件	Disturbances on generation facilities (G1) 3件	Disturbances on generation facilities (G2)	
Violation of standards on voltage (OV0) 60件	N-1 violation (ON1) 45件	Separation from the grid (RS2)	
	Violation of standards on voltage (OV1) 11件	Emergency State (OE2)	
	Lack of Reserve (OR1) 2件		
	Alert State (OA1) 28件		

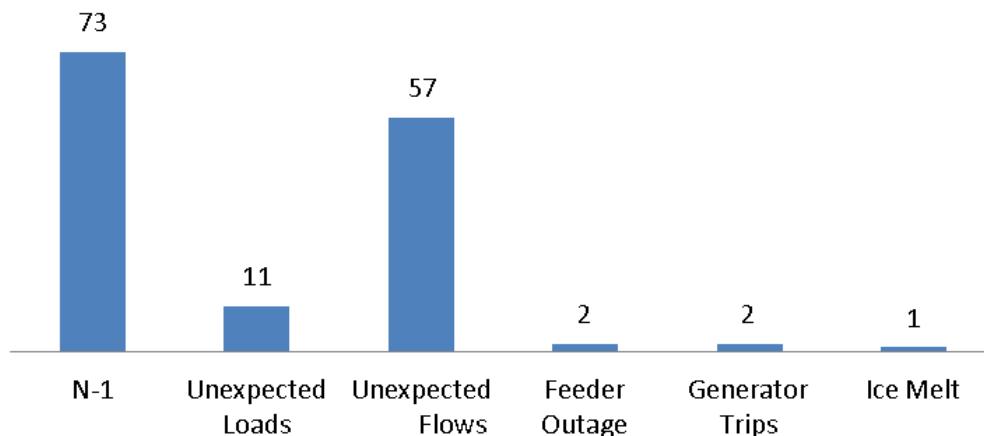
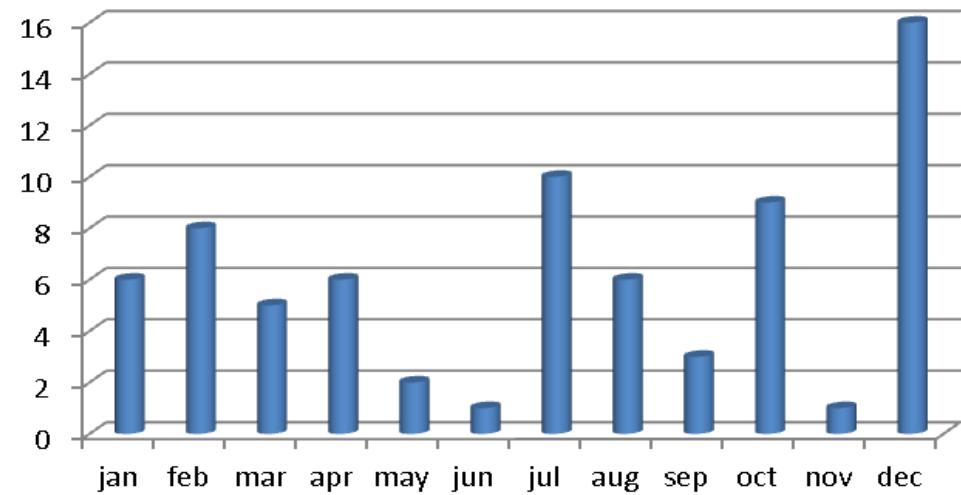
数字は
2014年
の実績

+ N-1違反の要因分析 (2013年)

N-1 violation incident durations



N-1 By Month



(source) ENTSO-E: Incident Classification Scale
2014 Annual Report (2015)

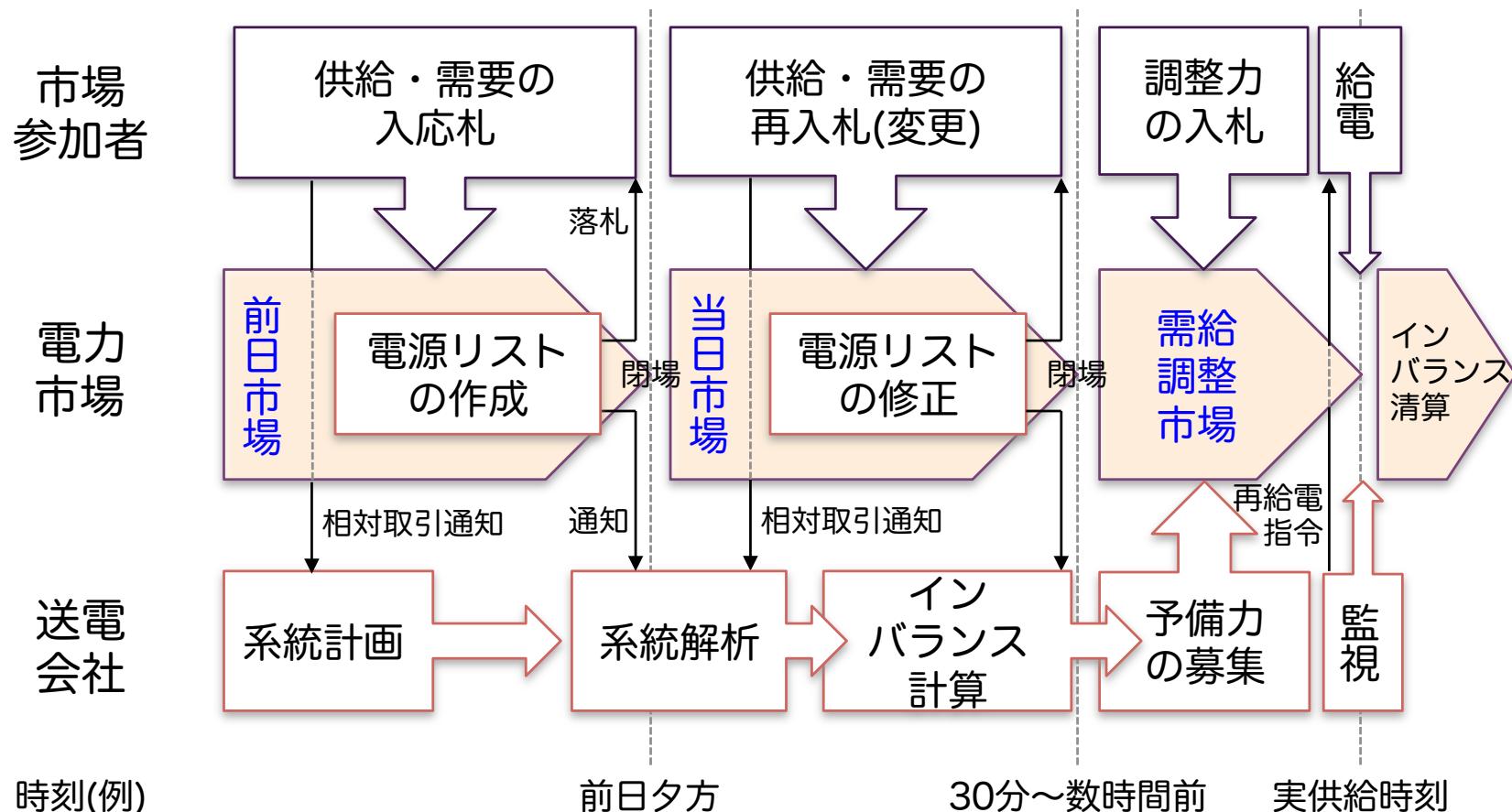
+ 目 次

- 1. はじめに
 - 世界で何が議論されているか？
 - VREのメリットオーダー効果と火力発電の退潮
- 2. VRE大量導入時代の柔軟性の考え方
 - 系統柔軟性の供給源
 - 火力・原子力による柔軟性の供給
 - 風力による柔軟性・アンシラリーの供給
- 3. VRE大量導入時代の供給信頼度の考え方
 - kW価値と容量クレジット
 - 確率論的
- 4. VRE大量導入時代の市場設計
- 5. まとめ

+ 電力市場と系統運用者の役割

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
 - 託送料金収入で経営。
 - 再エネを積極的に受け入れるようになる。

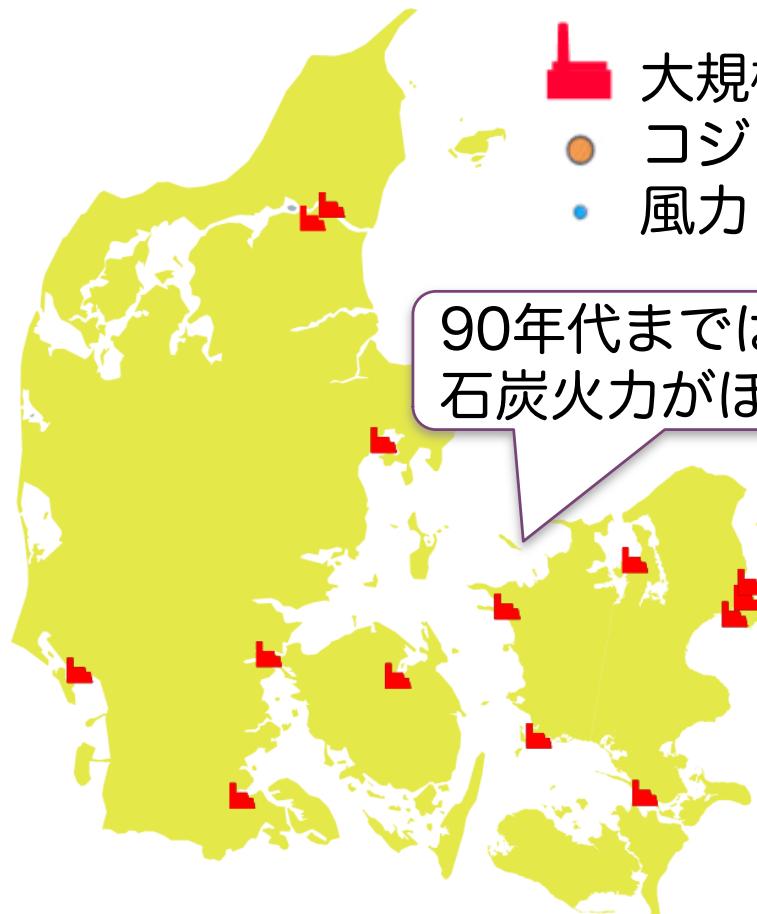
+ 日本になかなか伝わらない 　　欧洲の電力情報

- 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

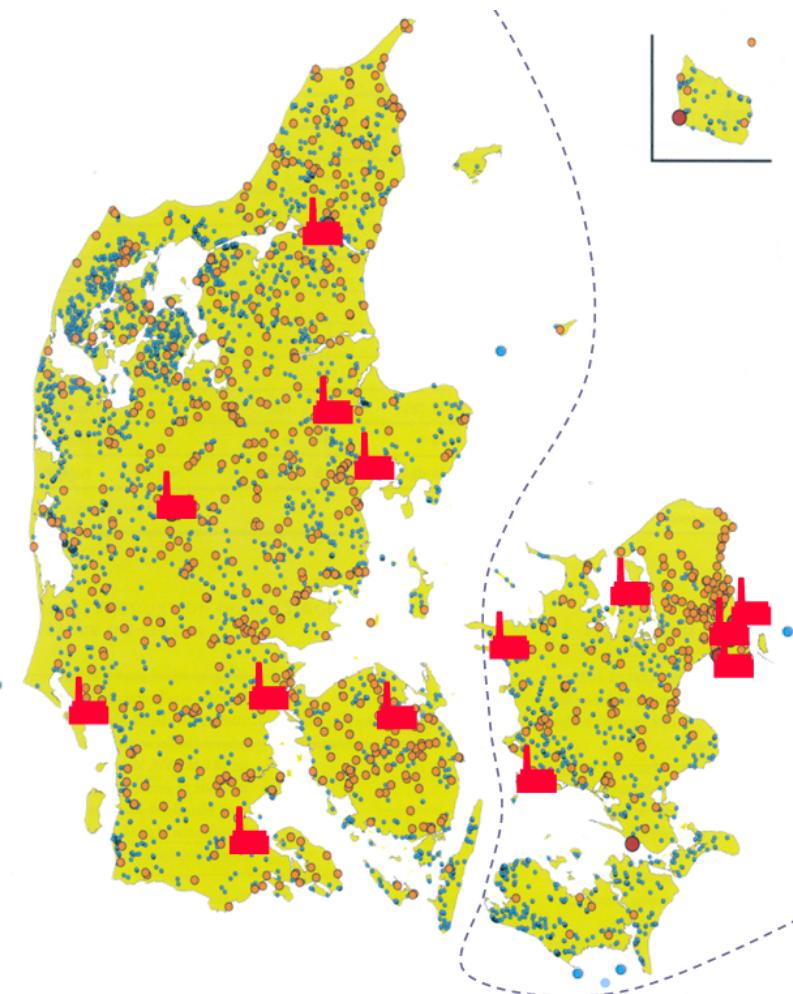
+ 電源構成の変化

小規模分散型コジェネ
を積極的に導入

大規模集中電源（1980年代頃）



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

+ 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。

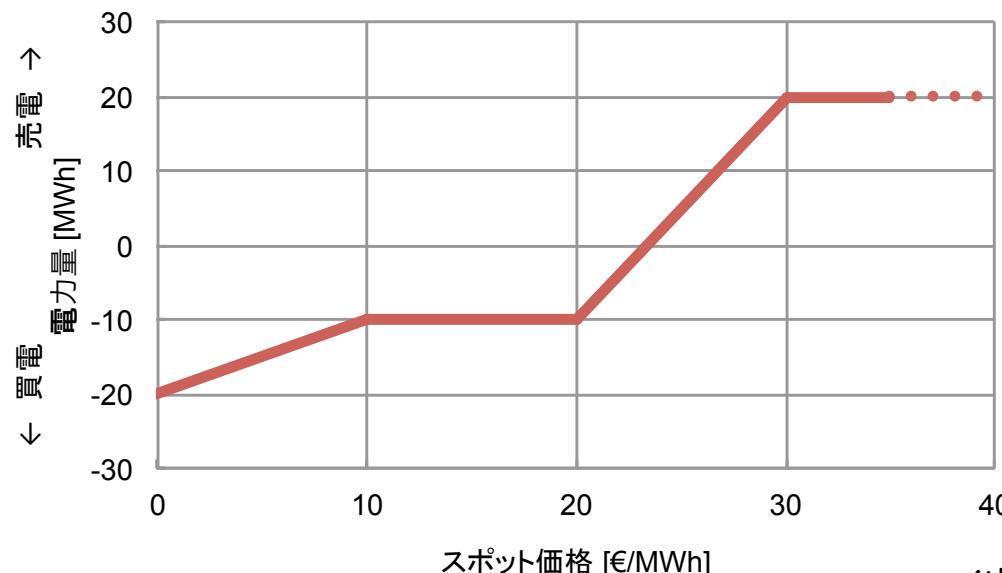


2006年に法制化

- 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。

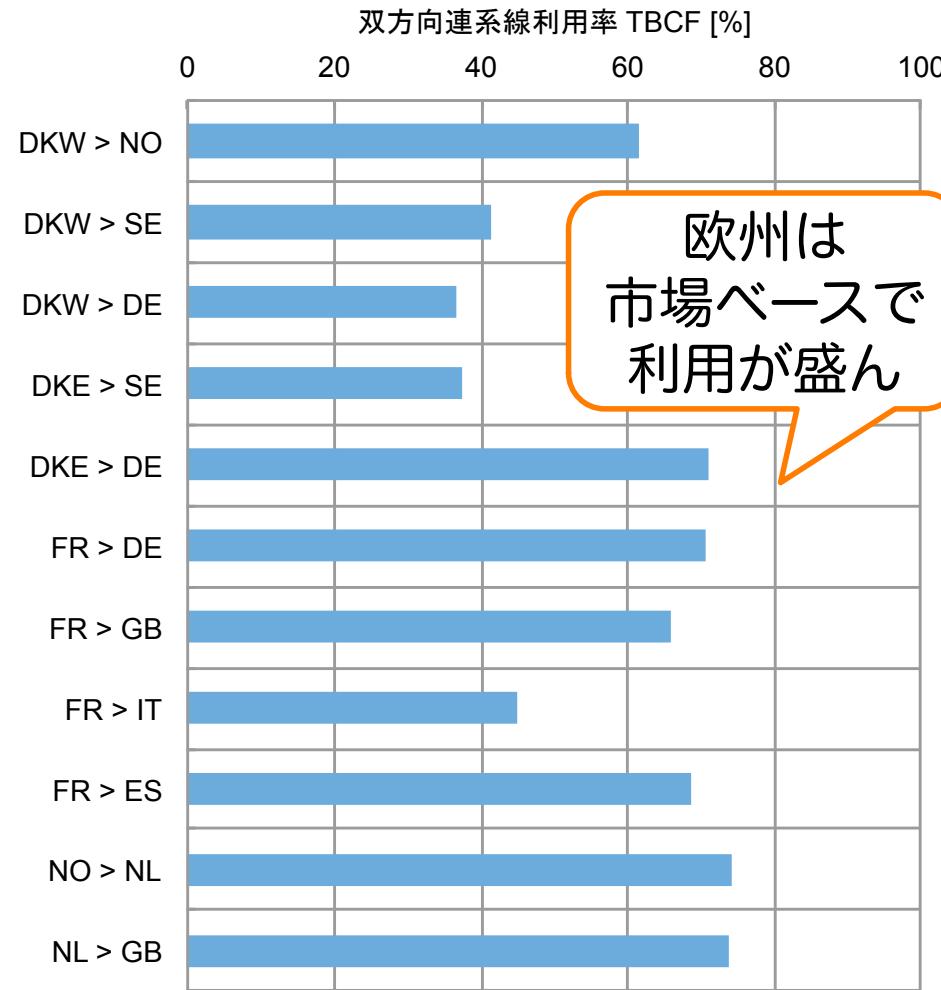
+ コジェネがなぜ柔軟性を持つのか？

- デンマークのコジェネは、系統運用者(TSO) だけでは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。

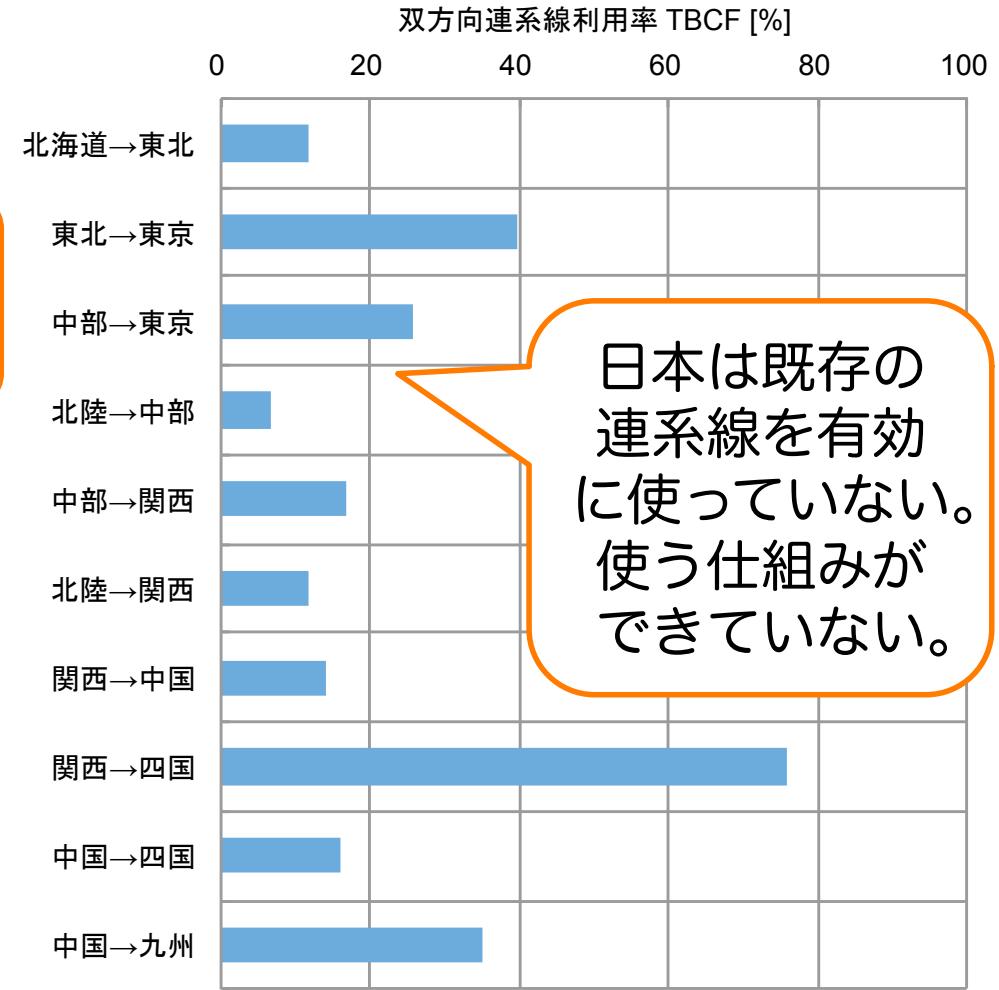


これが本来の
「スマートグリッド」
のはずでは？

連系線利用率の日欧比較 (年間最大運用容量に対する比率)

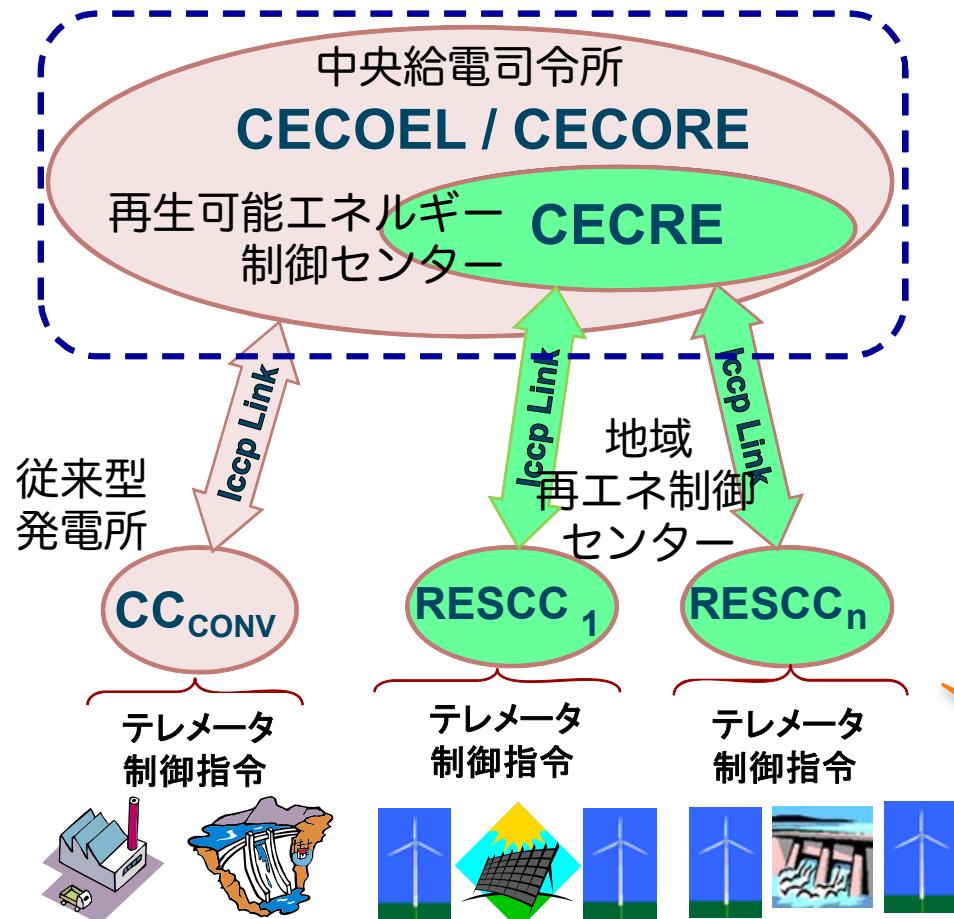


欧洲は
市場ベースで
利用が盛ん



日本は既存の
連系線を有効
に使っていない。
使う仕組みが
できていない。

+ 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

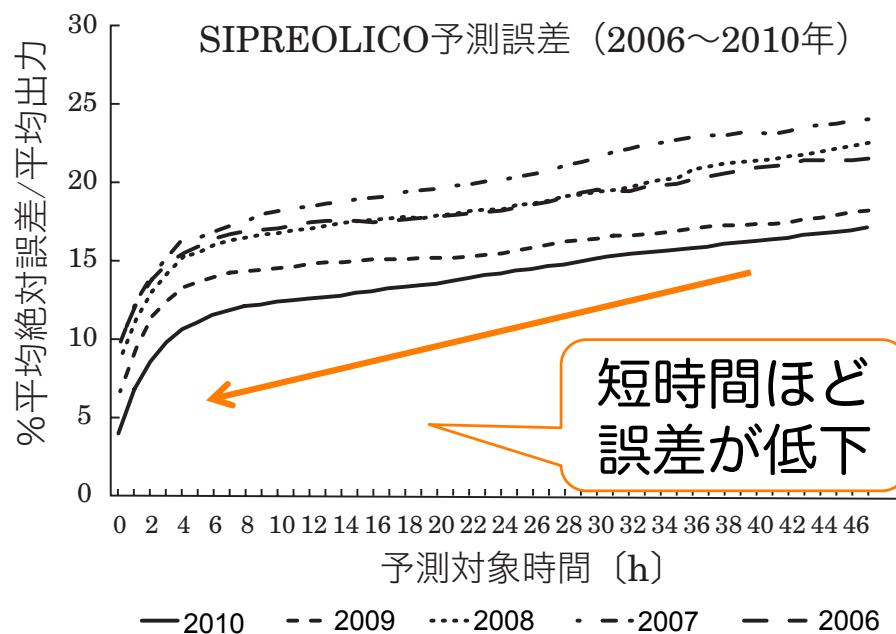
- スペインでは中央給電司令所に再生可能エネルギー制御センターを世界に先駆け設置。
- 全ての大規模風力+太陽光をリアルタイムで監視。
 - 今どれくらい発電しているのかわかる。予測精度向上。
 - いざというときに止められる(但し年間0.8%程度)。



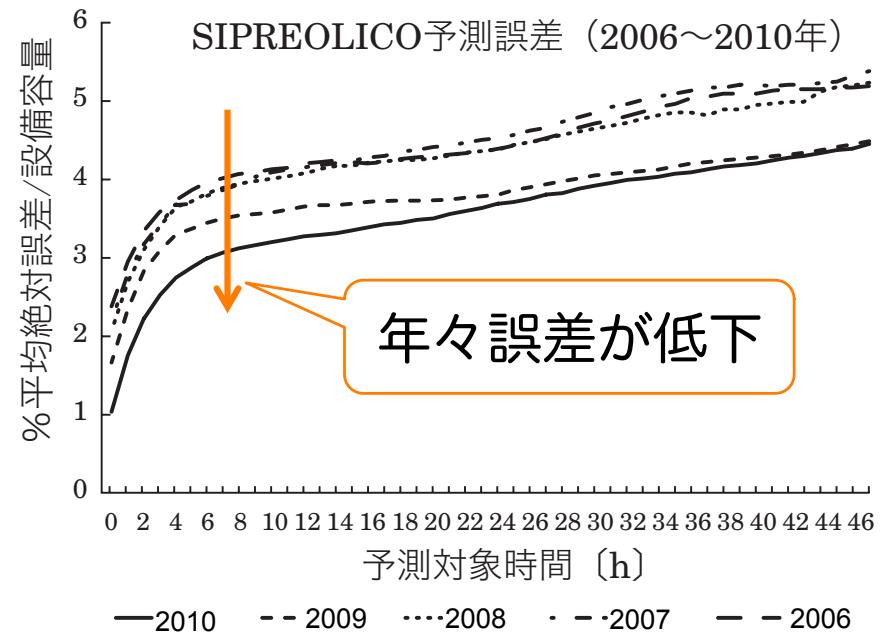
- スペインでは、変動電源に**通信要件**を課すことにより大量導入を可能に。
 - 監視・制御機能を義務づけ(スペイン王令)
 - 系統安定度を維持しながら大量導入を実現。

+ 予測技術の向上

予測が短時間ほど必要な
予備力は少なくて済む



誤差が小さいほど必要な
予備力は少なくて済む

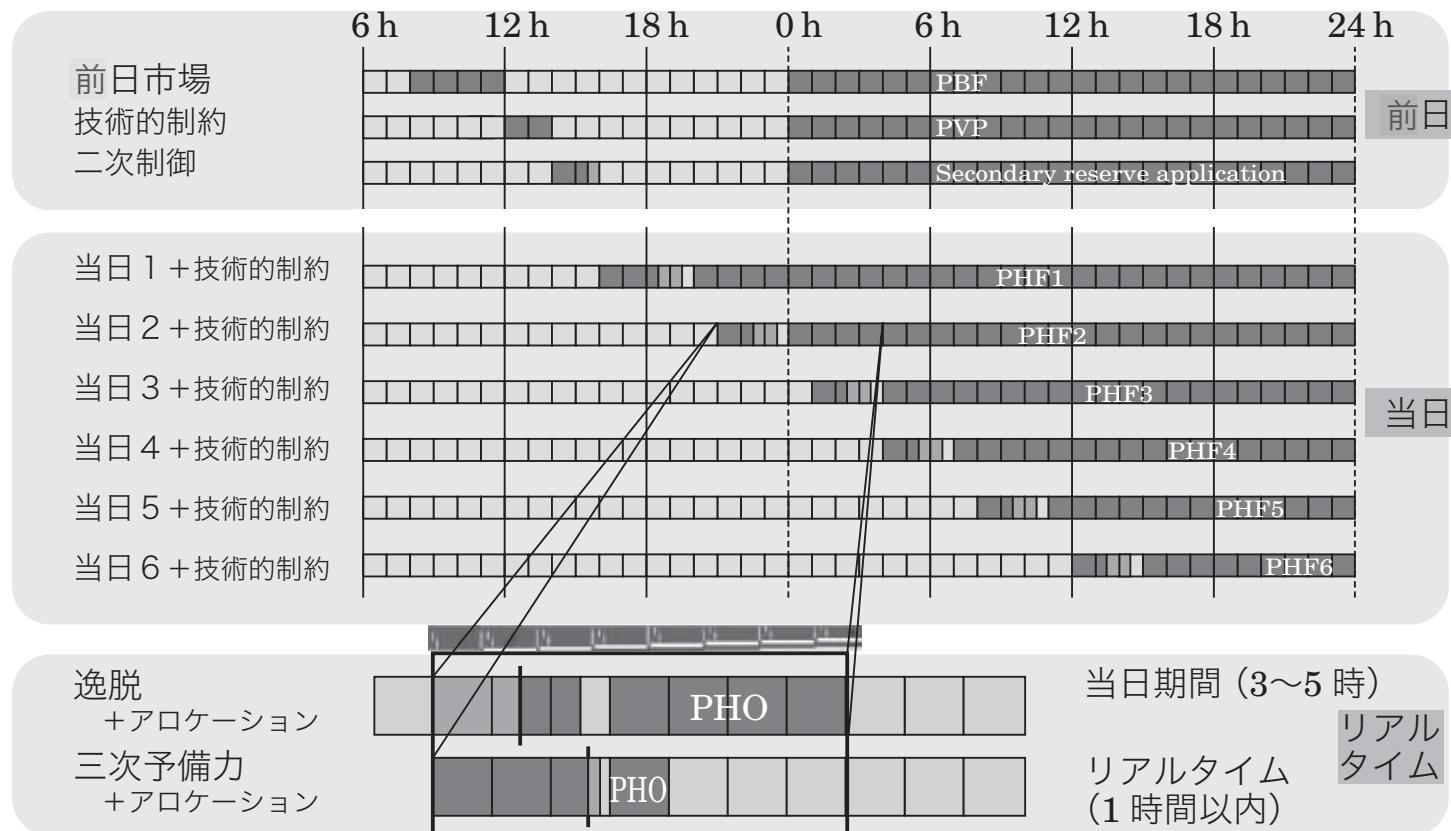


(出典) アッカーマン: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, 2013

+ 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。



(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

+ プライスキャップの問題

■ エネルギーオンリー市場

- ピーク時の価格高騰を許容
- 使用権契約が大きな障壁 (DRにディスインセンティブ)
- 料金規制が障壁になる場合も
- 期待通りに高騰しない場合も ⇒ 予見不確実性
- 市場操作の可能性 ⇒ 透明性・公平性の問題

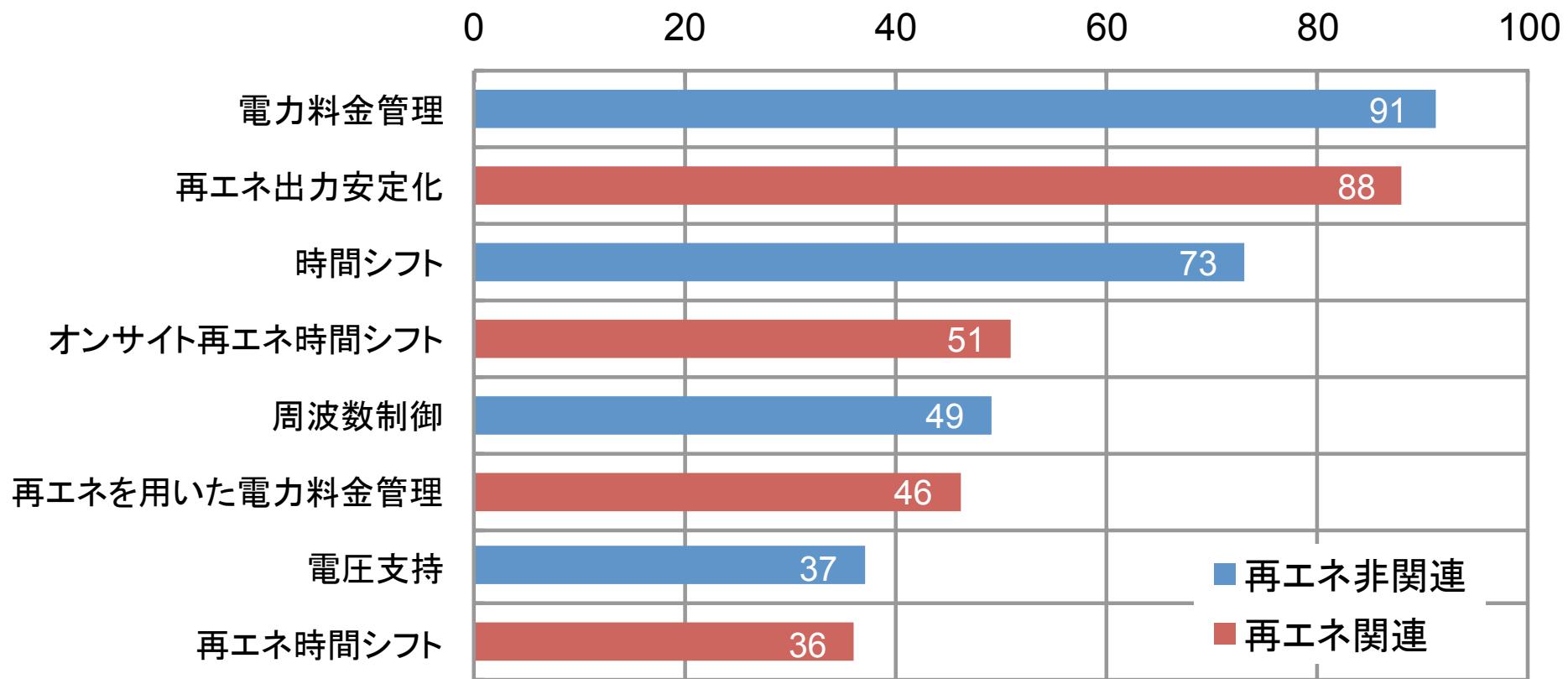
■ 容量メカニズム

- 単にピーク時のエネルギー確保ではなく、予備力の確保 (特にドイツのMarket 2.0での議論)
- 需給調整市場/アンシラリー市場との組み合わせ
- 超短時間市場 (sub-hourly market) の創出
- 「容量市場」は規制色が強く「社会主義的だ」と市場から批判がある場合も。
- 従来技術の延命政策にならぬように。

蓄電池は何のため？

62

- 欧米の蓄電池開発はVRE変動対策ではなく市場取引のため。日本は…？



+ まとめ

- なぜ世界中で再エネ導入が進むのか？
 - 再エネ(特に風力)は**費用便益比**が大きいから。
 - 再エネ(特に風力)は**外部コスト**が小さいから。
- 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」。
 - 現時点では、調整力は火力によって供給した方が便益が高い。
 - 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。 \Rightarrow 炭素税、排出権取引による内部化
 - 将来は風力やコジェネなど**分散型電源**が調整力を担う。
 - 送電網整備への投資が盛ん。
(コストはかかるが費用便益比が高いから)

+ 今日の参考文献

専門入門



専門書



- 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: 再エネの技術的問題は克服可能 メディアを含め情報鎖国の日本, ジャーナリズム, 11月号, pp. 122-129 (2015)
- 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, 8)
- 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)



風力発電の アンシラリー供給能力 ～火力発電なしで電力の安定供給は 可能か？～

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

第49回
京都大学
再生可能エネルギー
経済学研究会