



京都大学  
再生可能エネルギー講座  
第2期  
第1回研究会  
(部門A)

2019年4月15日

# 欧州電力システムを巡る最新動向



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

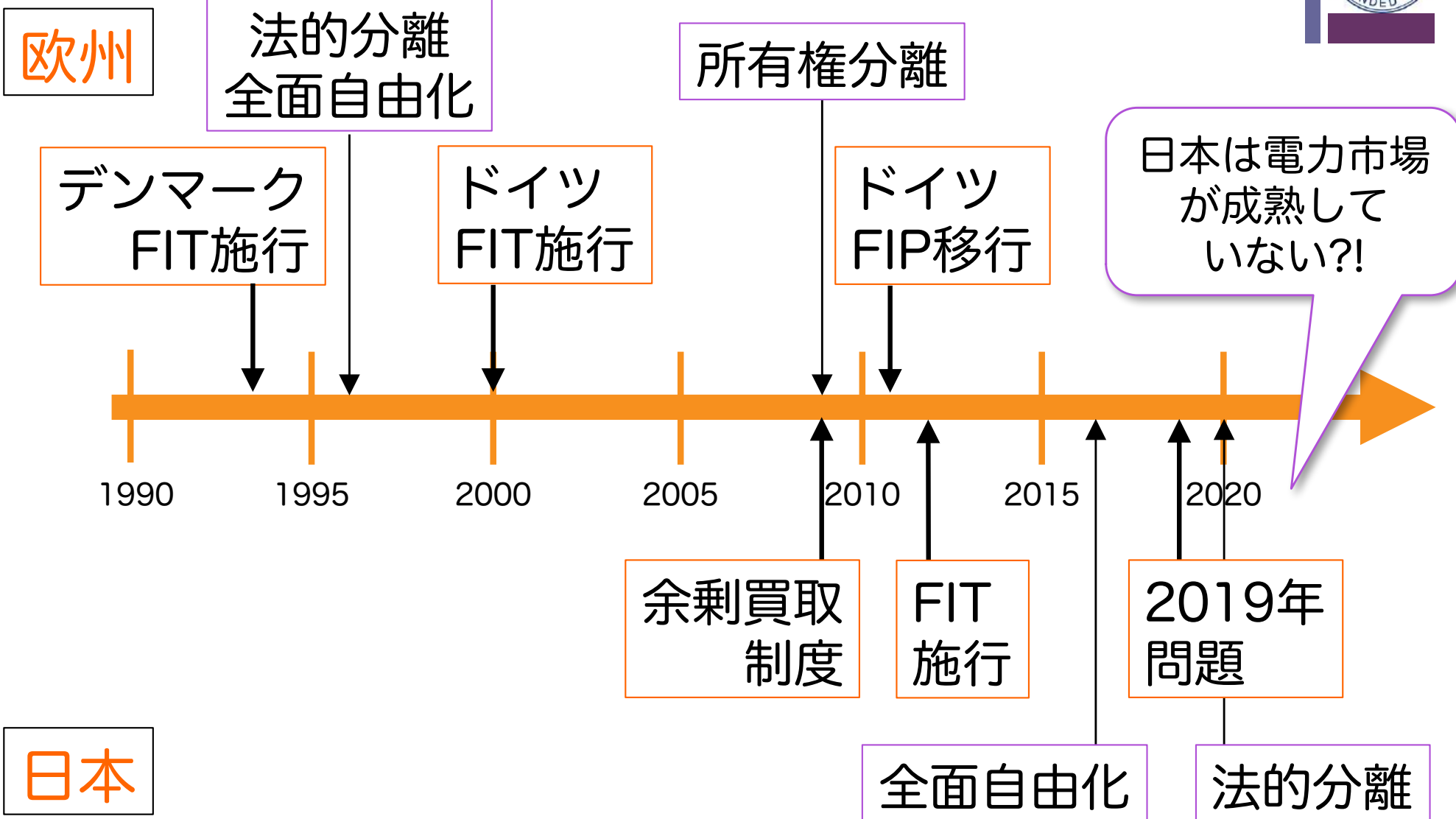
# + 目次



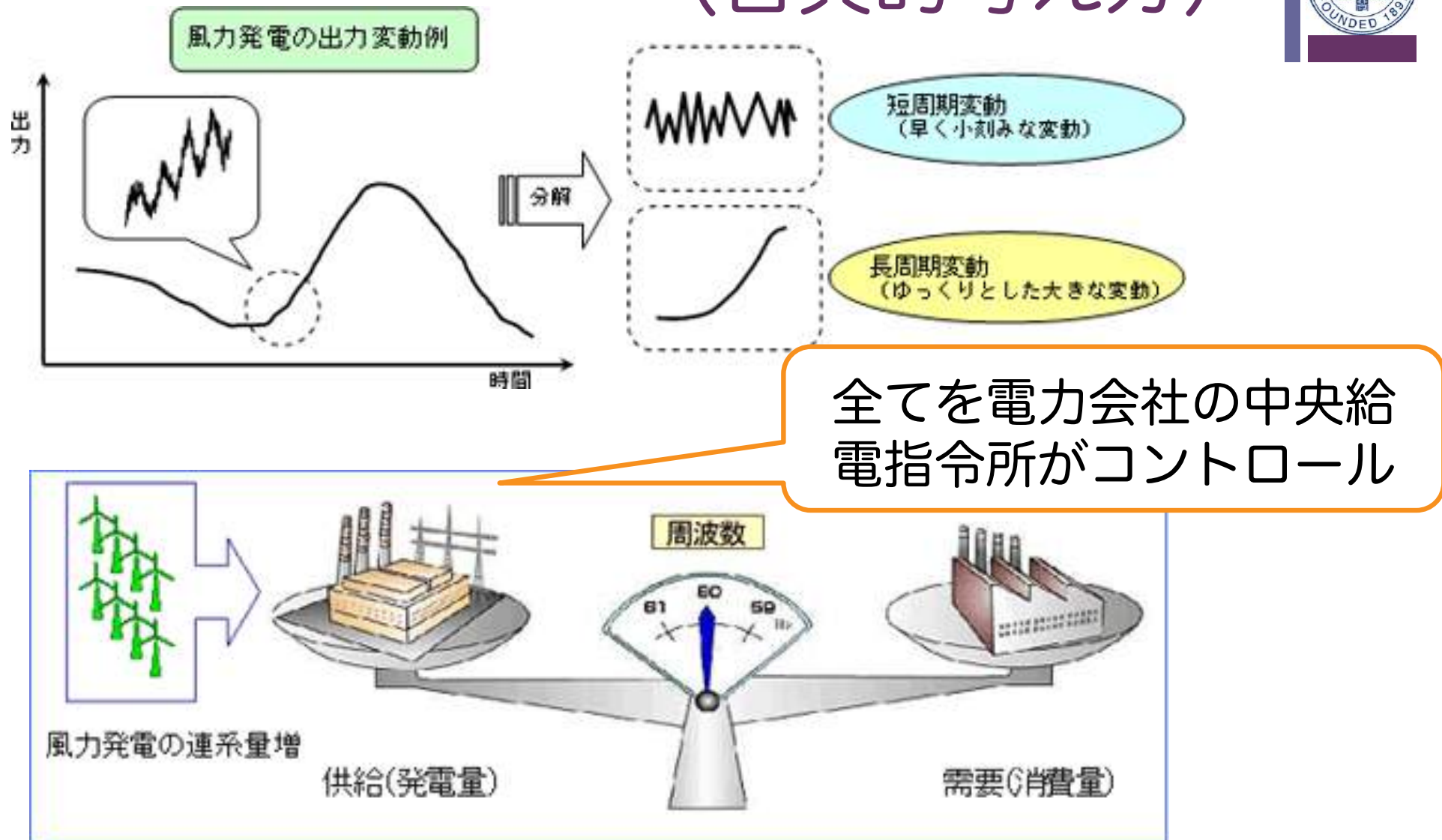
- 1. 欧州の電力市場の動向
  - 需給調整責任会社 (BRP) の役割
  - ジャーマンパラドックス
- 2. 欧州の系統運用の動向
  - 送電会社 (TSO) 間の協調
  - 動的線路定格 (DLR) の実用化
- 3. まとめ (日本への示唆)



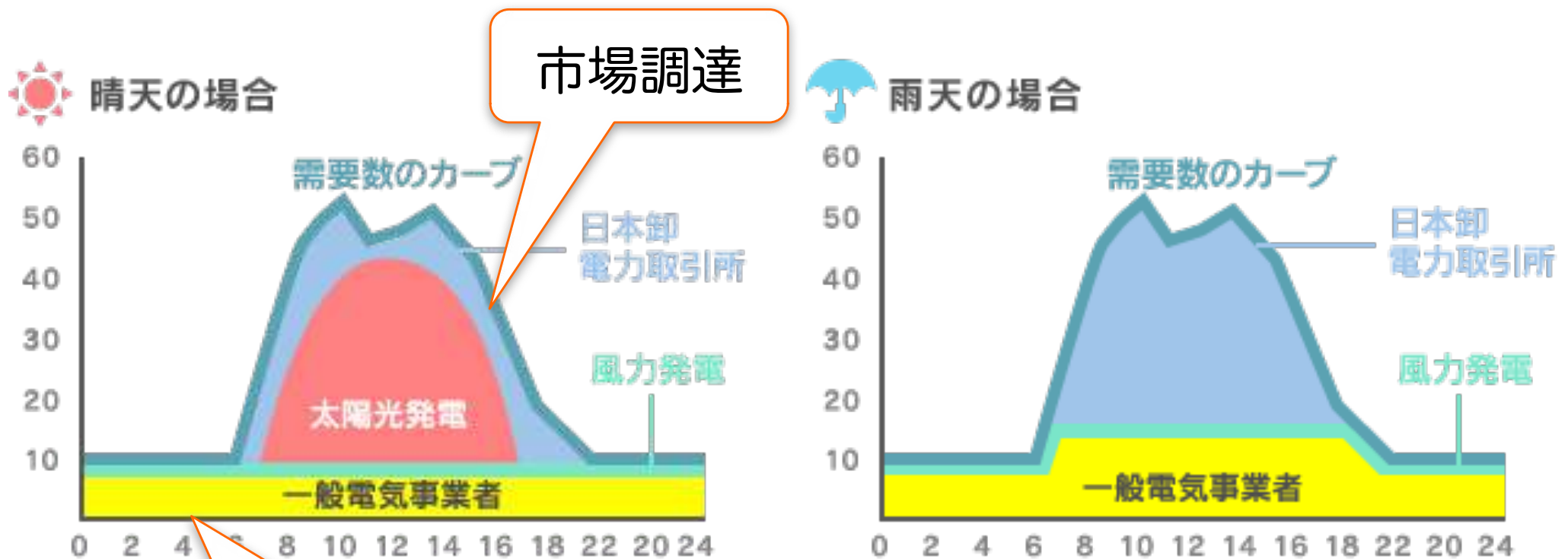
# + 再エネ促進と電力自由化の歴史



# + 需給調整は誰が行うか？ (古典的考え方)



# + 小売会社から見た 需給調整のイメージ（現在）



常時バックアップ (大手電力会社との相対 ⇒ 将来的には先渡市場などから調達)



## + 需給調整は誰が行うか？

- 古典的考え方 (日本では現在も)
  - 垂直統合された電力会社の中央給電指令所
  - 系統内のすべての発電所を集中監視・制御

エネルギーの民主化！  
…だけでなく、  
需給調整も民主化！

- 将来 (欧州では現在既に)
  - BRP: Balance Responsible Party が  
インバランスコストを最小化するように行動
  - 市場メカニズムで複数のプレイヤーが需給調整  
に参画・責任
  - 送電会社は主に監視。いざという時だけ介入。



# + 需給責任会社 (BRP) とは何か？

- BRP: Balance Responsible Party
  - 電力市場および送電事業者 (中央給電指令所) と通信し給電指令等の要求を受ける
  - 電力市場における電力商品の取引
    - 前日市場 (スポット市場) における取引
    - 当日市場における需給調整オペレーション
  - 送電事業者とのサービスのやり取り
    - 需給調整管理・計画
    - アンシラリーサービスの提供

# + BRPの役割



- BRPは大口ユーザーや発電所等の各社と契約を結び、それらのインバランスを一旦束ねる。それによって、各社のインバランスは相殺され、小さくまとめられる。
- TSOは、BRP各社とそのようにまとめられたインバランスの精算を直接に行う。
- このようにインバランス精算に当たっては、TSOとの間を卸業者のような形で仲介するのである。

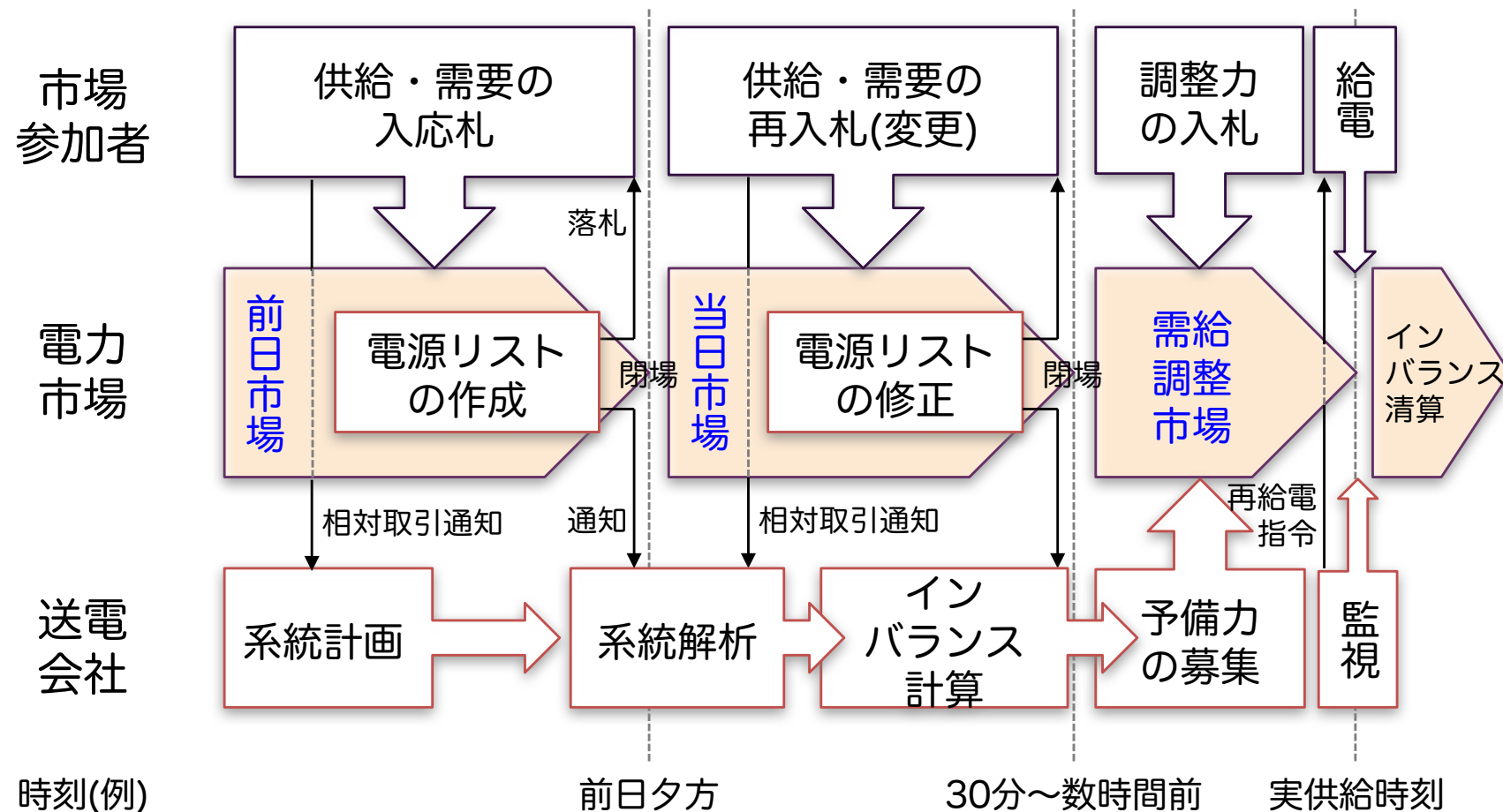


# + 自由化された市場取引の例

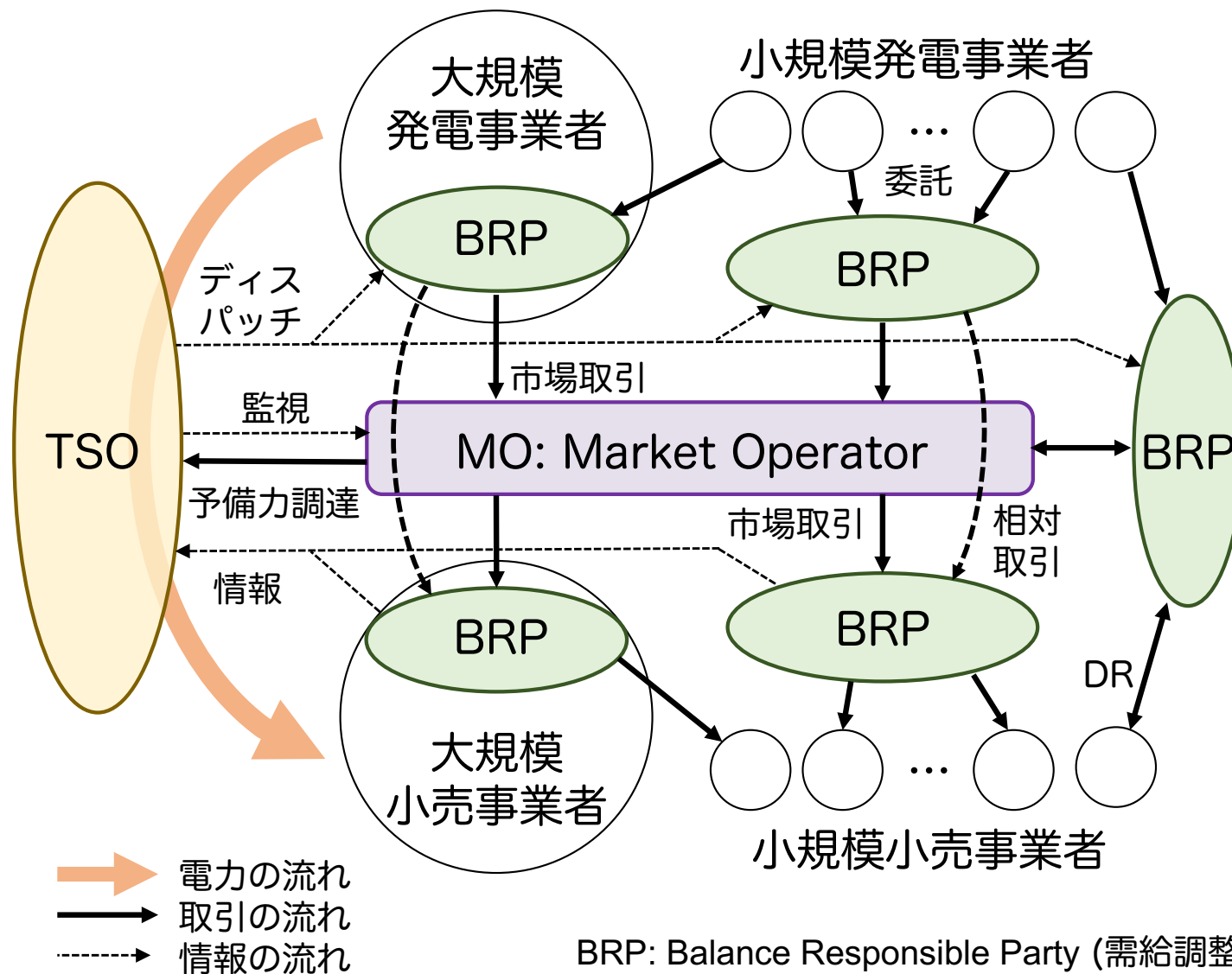
自由化前：電力会社が一元管理



自由化後：送電会社と電力市場の二本柱



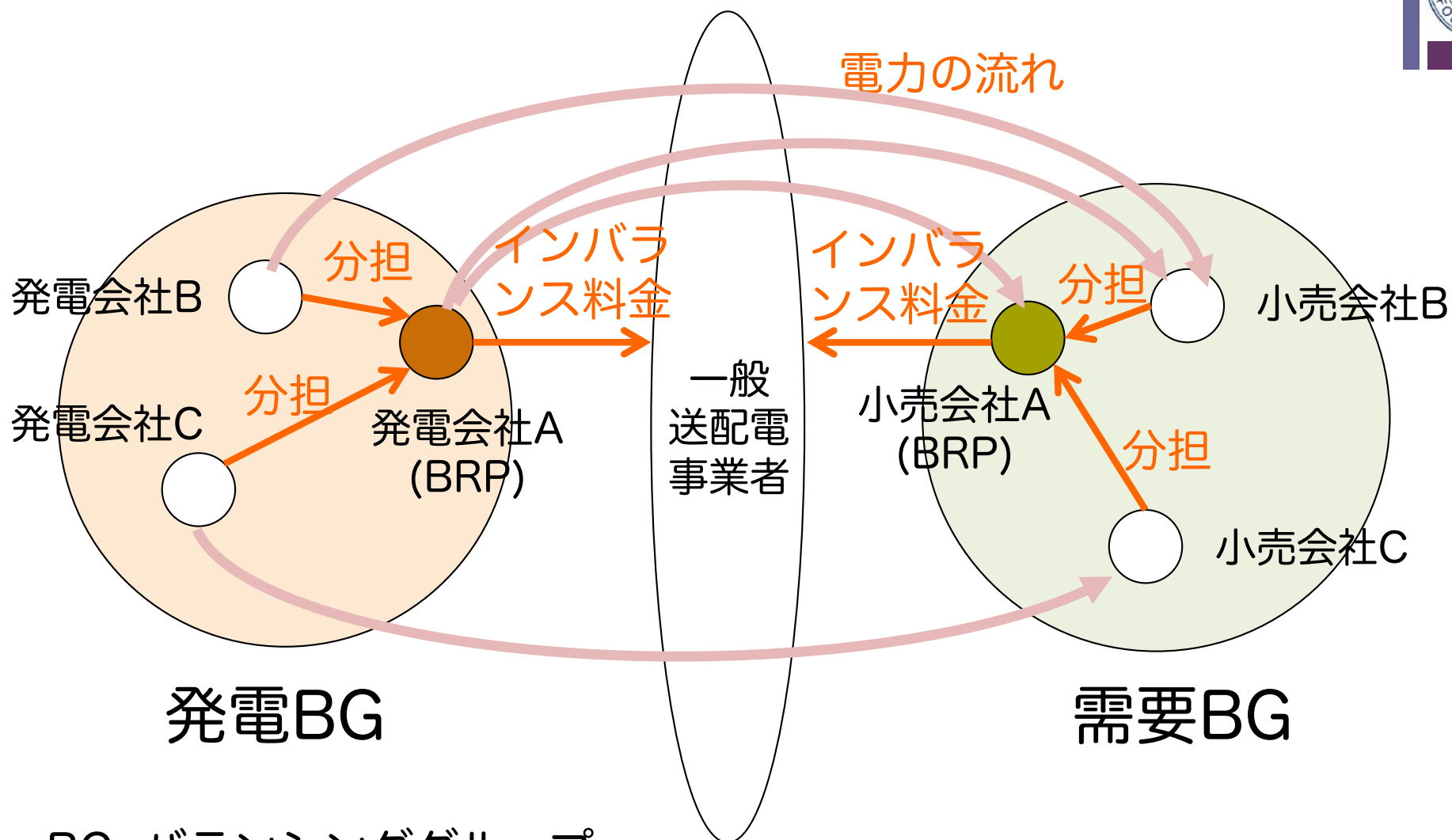
# + 自由化市場におけるBRPの役割



アグリゲータやVPPの概念を包含

BRP: Balance Responsible Party (需給調整責任者)  
 TSO: Transmission System Operator (送電系統運用事業者)  
 DR: Demand Response (需要応答)

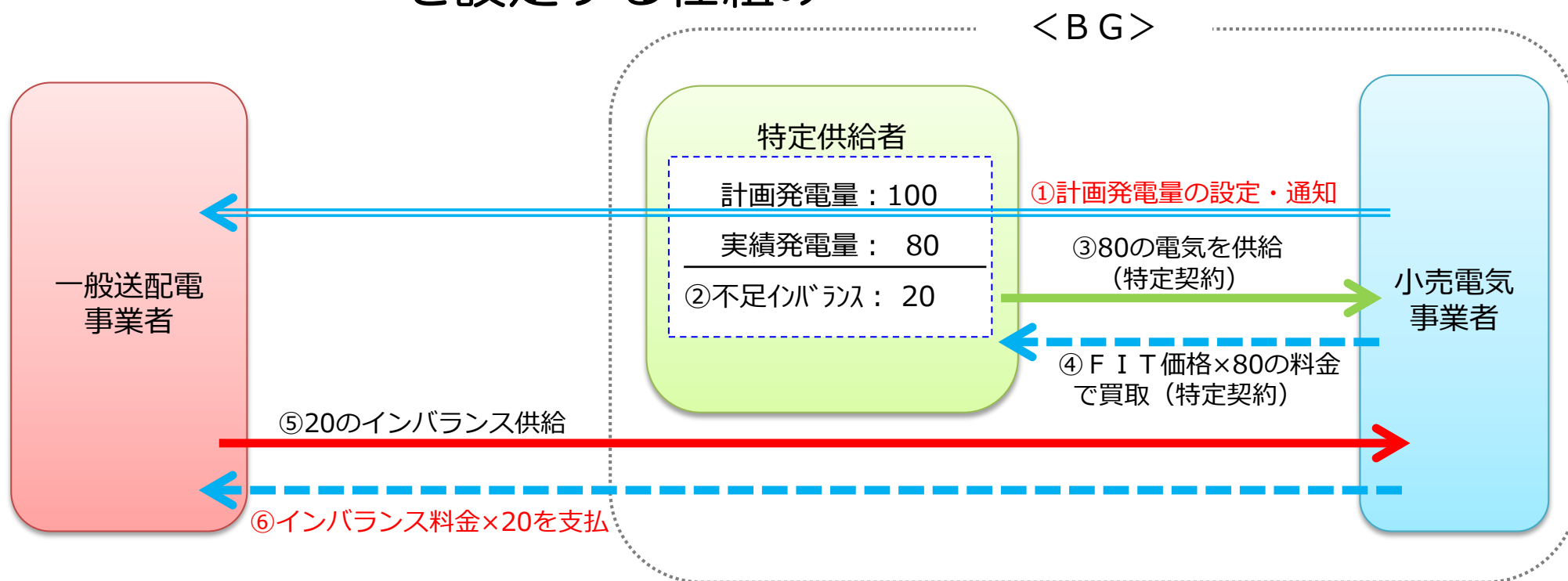
# + 日本のバランスンググループ (BG)



BG: バランシンググループ  
BRP: 需給調整責任者 (BG代表者)

# + 特例制度②における バランスンググループ (BG)

特例制度② = 小売電気事業者がFIT認定電源の計画発電量を設定する仕組み





# + BRPとVPPは何が違うの？

## ■ VPP: Virtual Power Plant

- 技術ベースの概念。
- 使用権契約の考え方
- (特に日本語文献では) 相対契約のみで市場取引を想定していない場合が多い。

## ■ BRP: Balance Responsible Party

- 市場ベースの概念
- 確定数量契約の考え方
- (特に欧州では) 当日市場・需給調整市場の高速取引を想定



# + 使用権契約と確定数量契約

## ■ 使用権契約

- 需要家は決まった価格で好きなだけ買え、発電側は追従する
  - 電力会社は膨大な発電余力と送電余力とを準備しておかなくてはならない
  - 発電余力を使い切った後では停電を起こしやすい

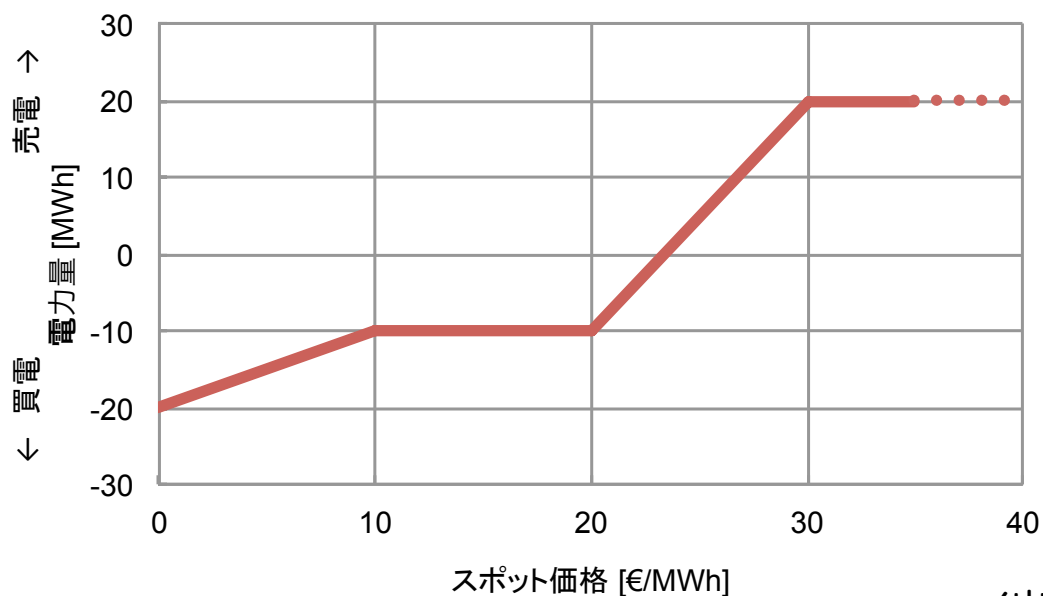
## ■ 確定数量契約

- 前日に計画値を届け出、計画値からの差分に対して精算する
  - 電力不足時に需要家に節電動機
  - 発電所は余剰発電能力を減らせる



## + デンマークのコージェネ

- デンマークのコージェネは、系統運用者(TSO)だけでなく電力市場とも通信する。
  - コー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
  - 数千台のコージェネが仮想発電所 (VPP) として動作。



デマンドレスポンスも  
同様にネガワット  
発電所となり得る。

# + 目次



- 1. 欧州の電力市場の動向
  - 需給調整責任会社 (BRP) の役割
  - ジャーマンパラドックス
- 2. 欧州の系統運用の動向
  - 送電会社 (TSO) 間の協調
  - 動的線路定格 (DLR) の実用化
- 3. まとめ (日本への示唆)





# + 「ジャーマンパラドックス」

## 【誤解と神話】

変動性再エネ(VRE)が増えると  
バックアップ電源が増える！  
(CO<sub>2</sub>が却って増える！)



## 【ドイツの実際】

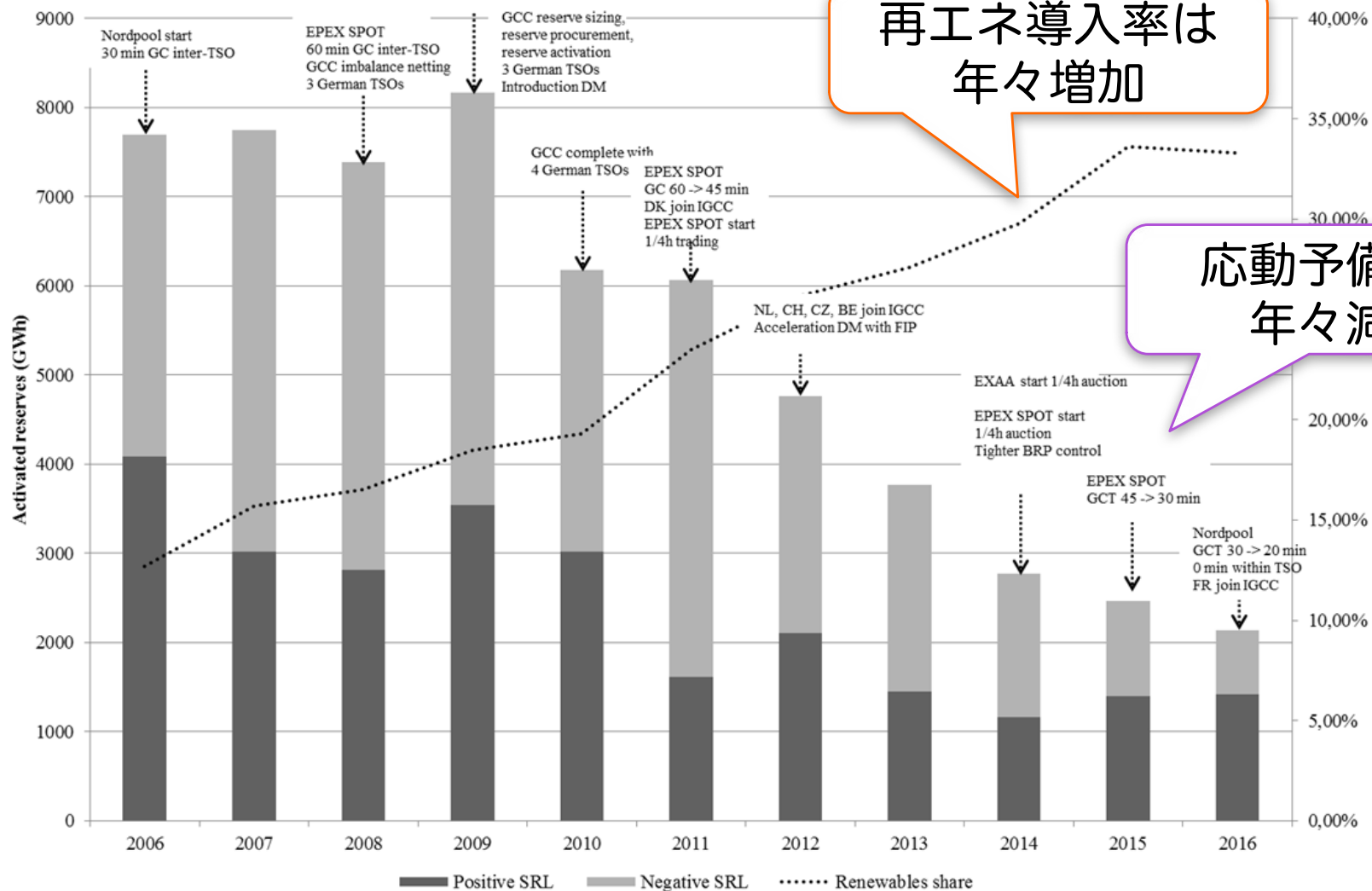
VREは増加したが実際に  
応動した予備力は減少

## 【理由】

適切な市場設計  
送電会社間の協調



# + 再エネ大量導入でも調整力は少なく て済む（ドイツの実例）



再エネ導入率は  
年々増加

応動予備力は  
年々減少

(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と  
再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)

# + ジャーマンパラドックスの原因①

20



## ■短時間商品の導入

- 2011年12月(EPEX SPOT当日市場): 1時間商品だけでなく15分商品の取引が可能
- 2013年6月(スイス), 2015年10月(オーストリア): 15分商品の取引開始、当日市場の開場時間が前日の午後4時からに変更
- 2014年9月(EXAA), 2014年12年(EPEX SPOT): 入札を通じて15分商品の取引が可能

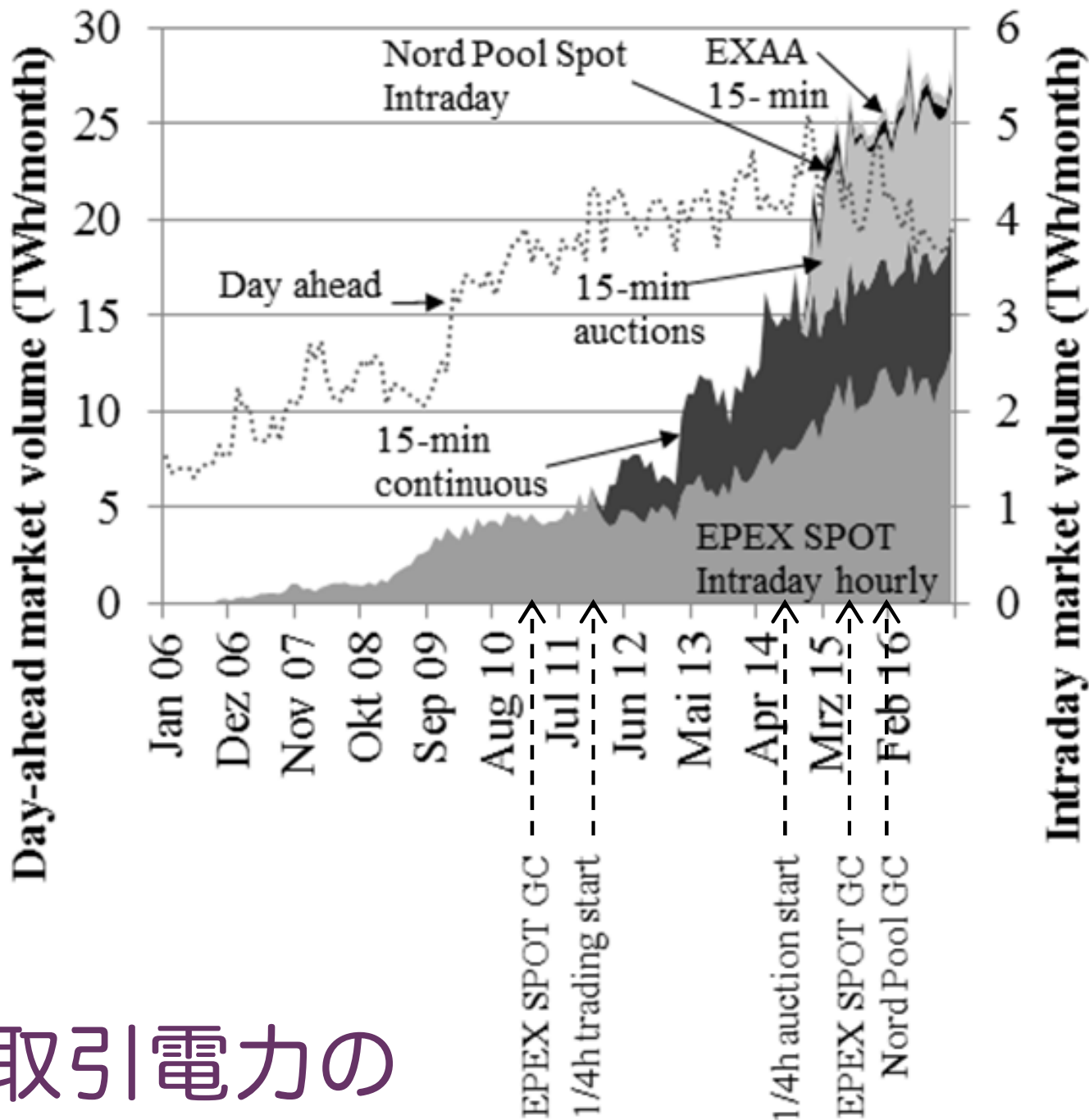
# + ジャーマンパラドックスの原因②



## ■ 市場閉場時間の短縮化

- 2008年(EPEX SPOT): 当日市場開設
- 2011年3月(EPEX SPOT): 市場閉場時間が実供給時間45分前に短縮
- 2015年7月(EPEX SPOT): 市場閉場時間が実供給時間30分前に短縮
- 2017年6月(EPEX SPOT): TSOへの受渡し5分前までの取引が可能

+



# 月間取引電力の推移

(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)

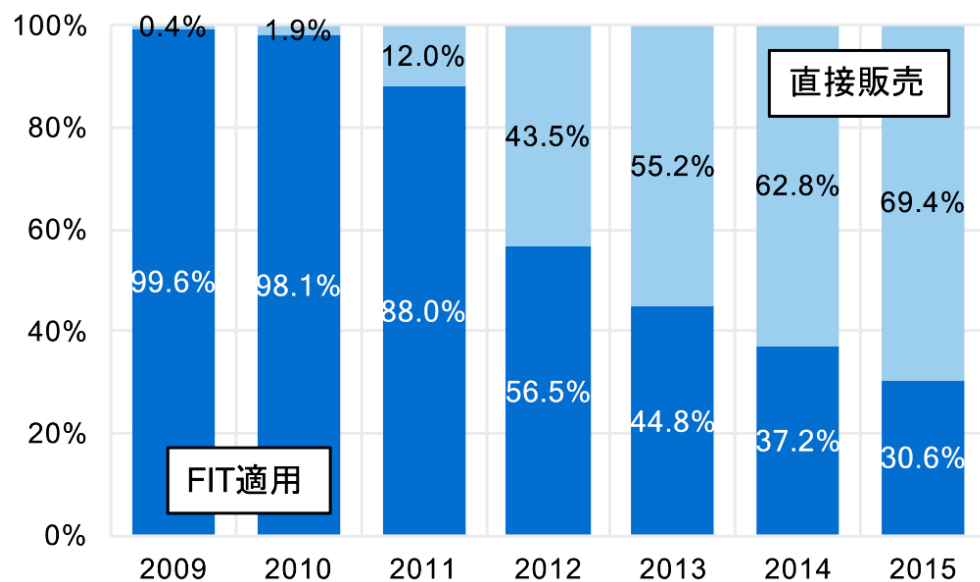


## + ジャーマンパラドックスの原因③

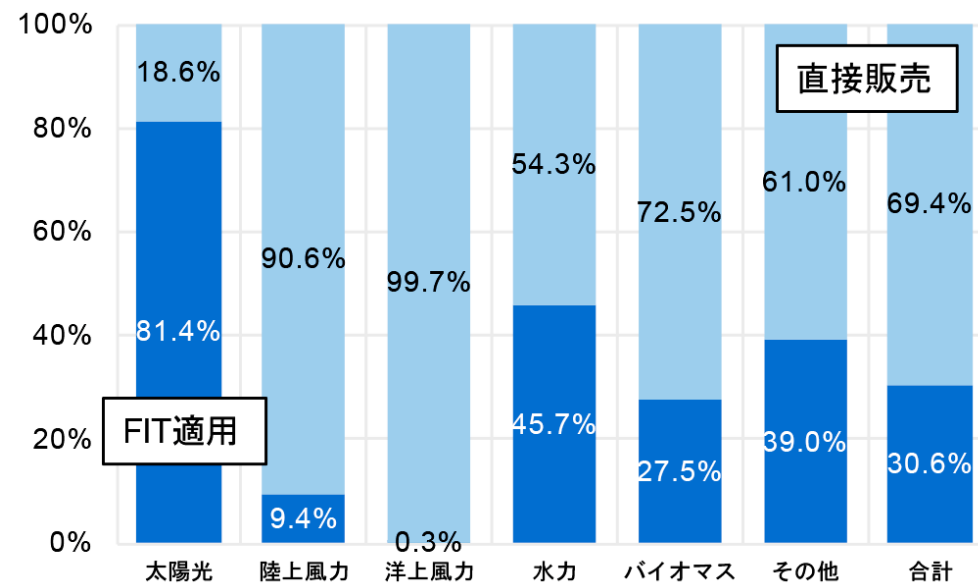
- **BRP**の運用の厳格化
  - 15分毎の需給バランス義務付け
  - インバランスには比較的重いペナルティ
  - 市場参加者が需給調整を担うインセンティブ
- **BRP**監視の強化 (2014年～)
  - TSO: 実績の悪いBRPに警告
  - BNetzA(規制者): 通告・資格取消



# ドイツの再エネ電源のFIT適用動向



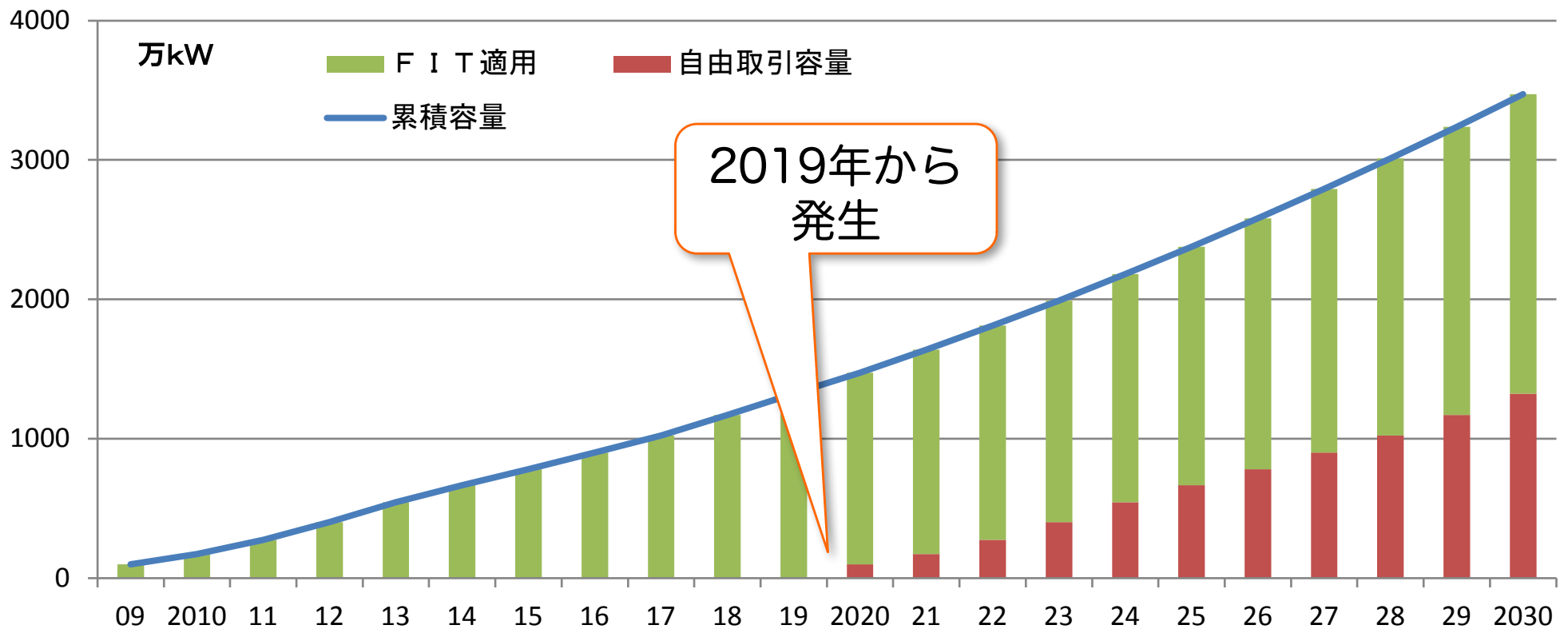
### 割合の推移



### 電源別割合(2015年)

(出典) 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム 経済・政策編, インプレスR&D (2019)  
 (データソース) Bundesnetzagentur (BnetzA): Monitoring report 2016 (2017)

# + 太陽光発電のFIT適用および自由取引容量の推移







# + FIT卒業電源の選択肢

## ■ 余剰電源の自由取引

- ① 自分で取引相手（小売事業者）を探す

- → 個人では極めて困難

- ② 自分で電力市場に入札する

- → 個人では極めて困難

- ③ アグリゲーターと契約する

最も現実的  
な選択肢

## ■ 全量自家消費する

- 余った分は蓄電池に貯める

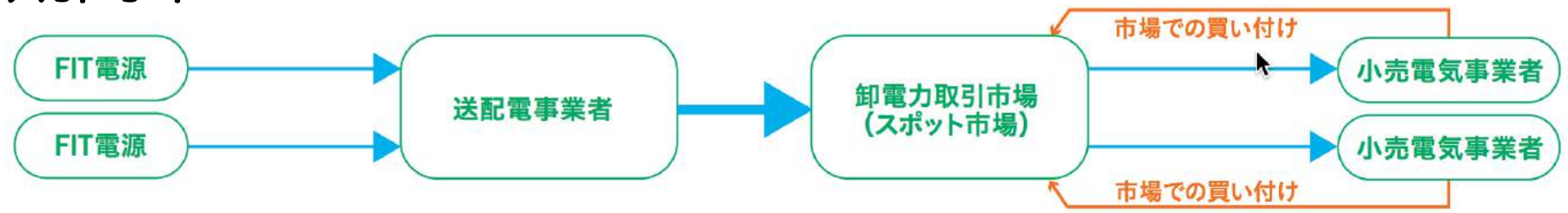
- → 高コスト。採算が取れるか不明

市場価格低廉化  
にあまり貢献  
しない

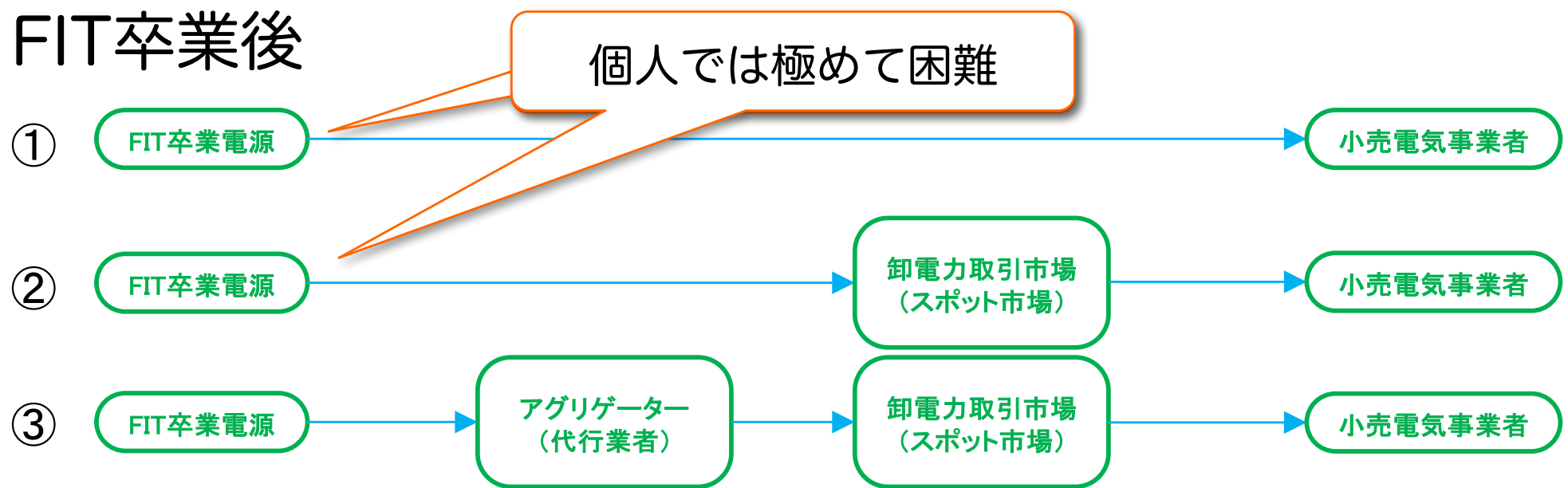


# + FIT卒業後の太陽光の契約上の電気の流れ

## FIT期間中

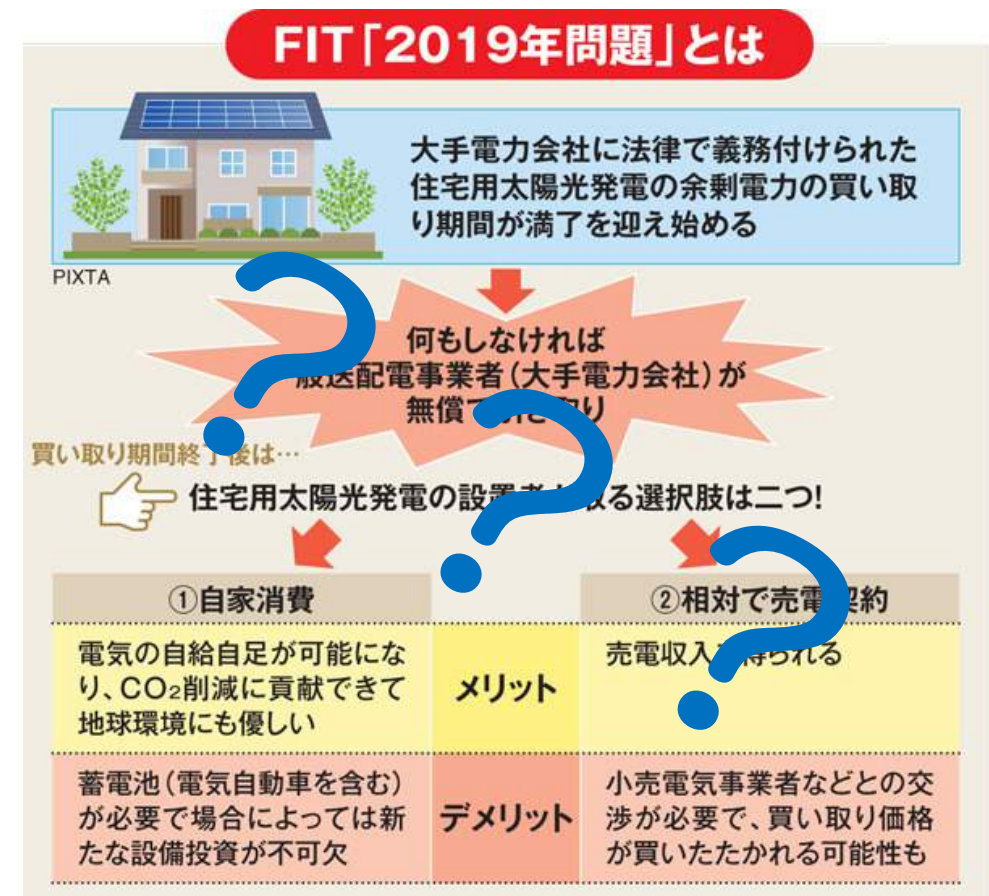


## FIT卒業後



# + 2019年問題の解決策

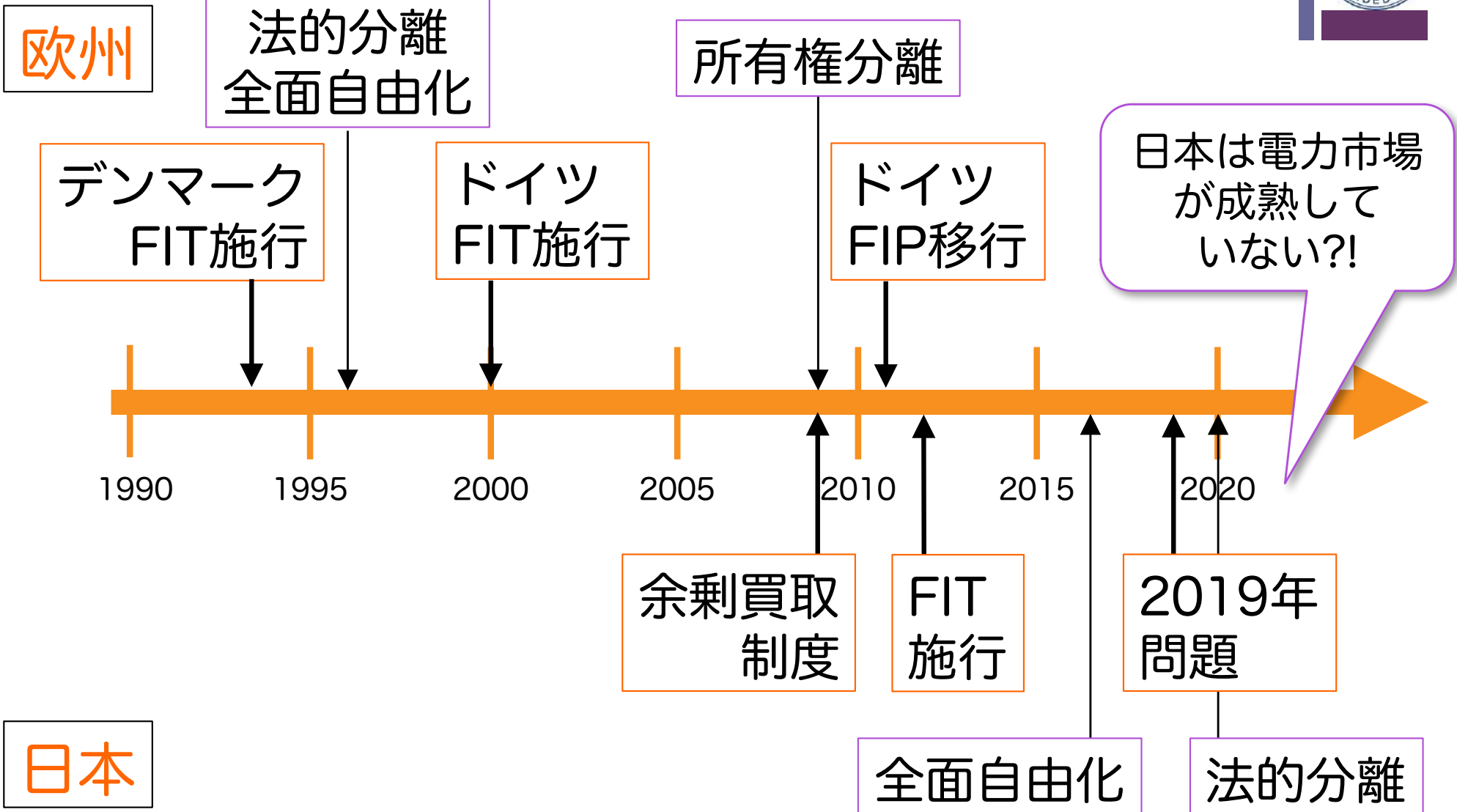
- 自家消費に採算性はあるか？
  - 安易な蓄電池神話
  - 費用便益分析の不在
  - 消費者不安心理の悪用
- 「バッドな地産地消」にならないために
  - 地産地消は鎖国や籠城ではない！
  - 市場取引の軽視はサステナブルではない



# + 再エネ促進と電力自由化の歴史

再掲

29

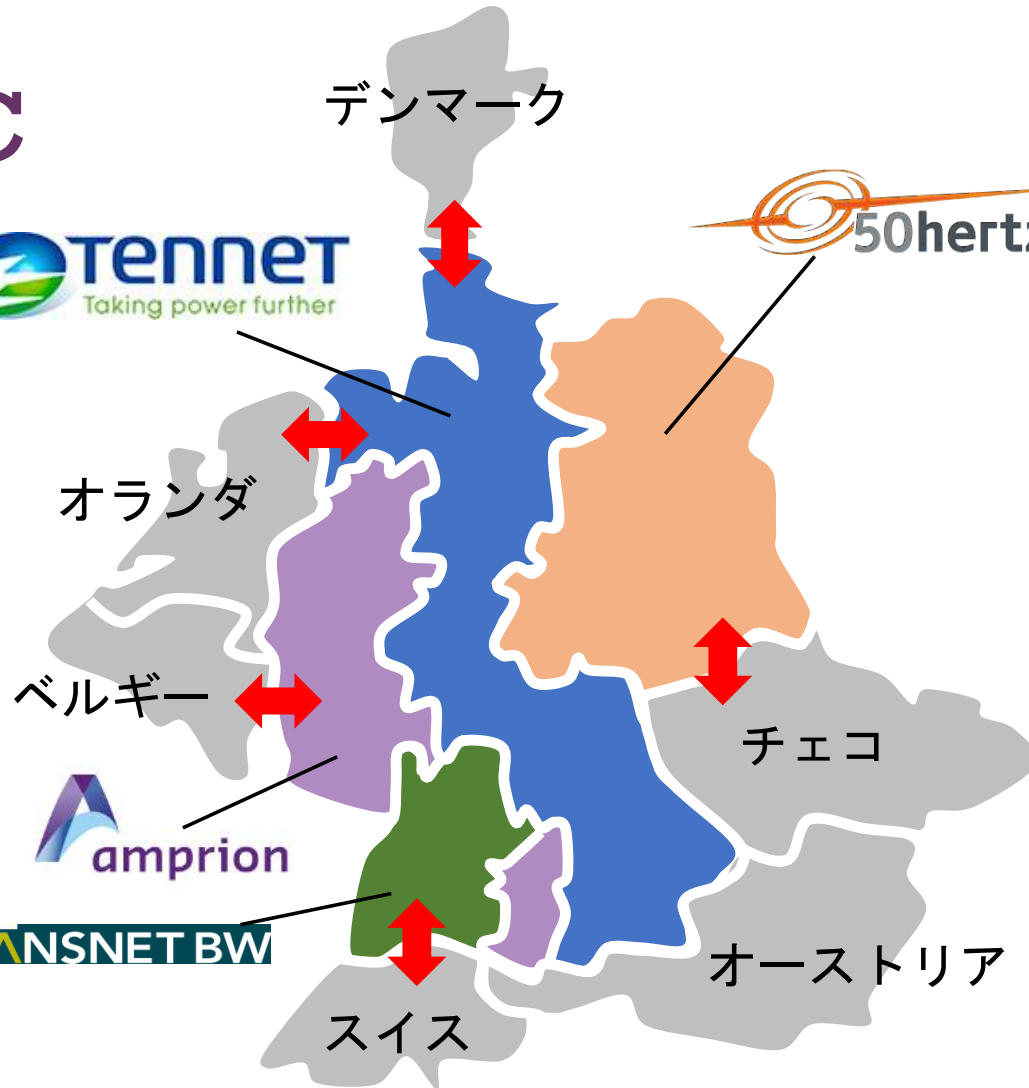


# + 目次



- 1. 欧州の電力市場の動向
  - 需給調整責任会社 (BRP) の役割
  - ジャーマンパラドックス
- 2. 欧州の系統運用の動向
  - 送電会社 (TSO) 間の協調
  - 動的線路定格 (DLR) の実用化
- 3. まとめ (日本への示唆)

# + GCCとIGCC



(出典) 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ~ 電力システム編, インプレス R&D (2018)

German TSOs GCC  
May 2010

TenneT NL CEPS  
Feb 2012 Jun 2012

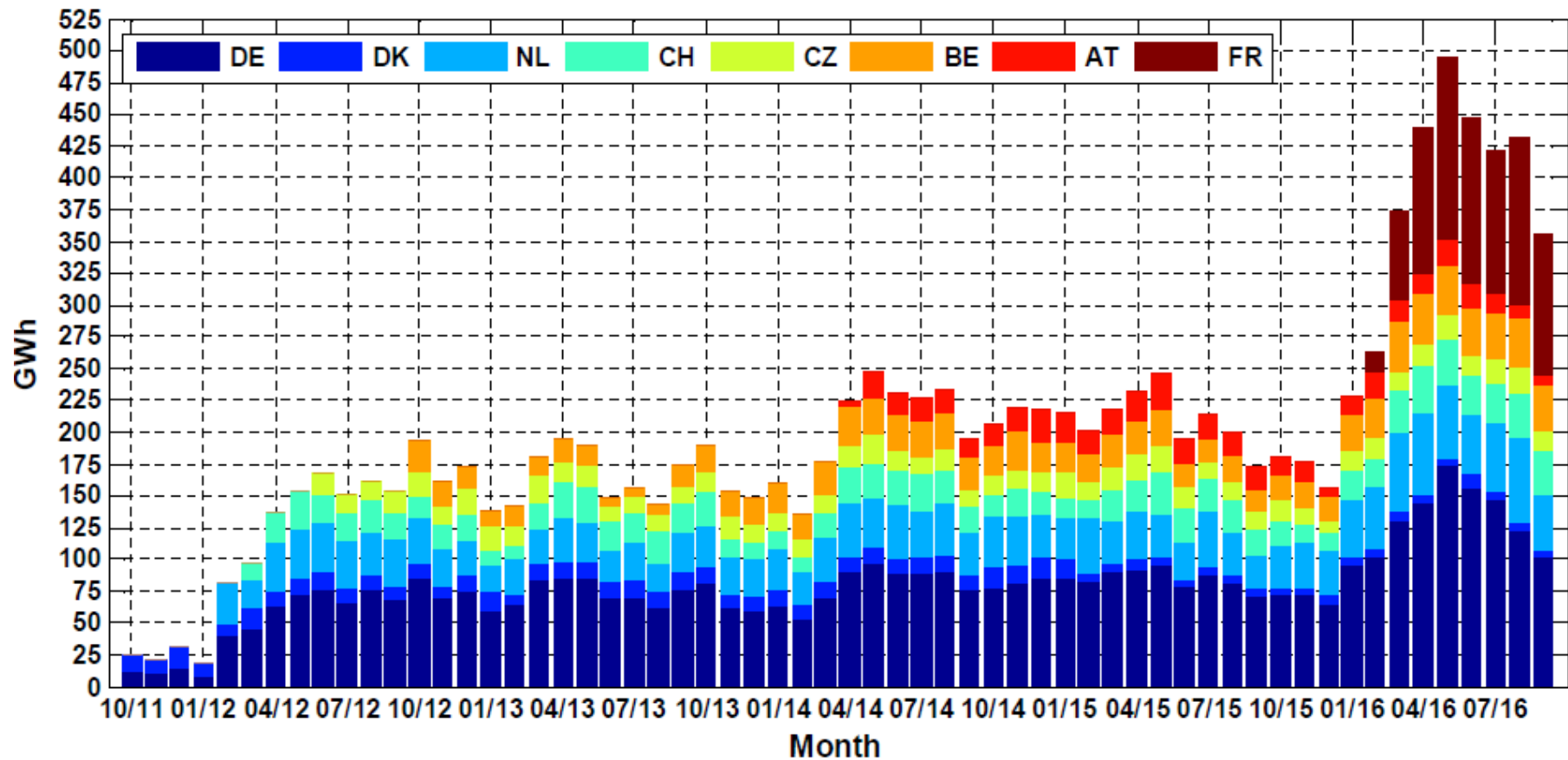
APG  
Apr 2014

RTE  
Feb 2016



Oct 2011 Energinet.dk  
Mar 2012 Swissgrid  
Oct 2012 Elia

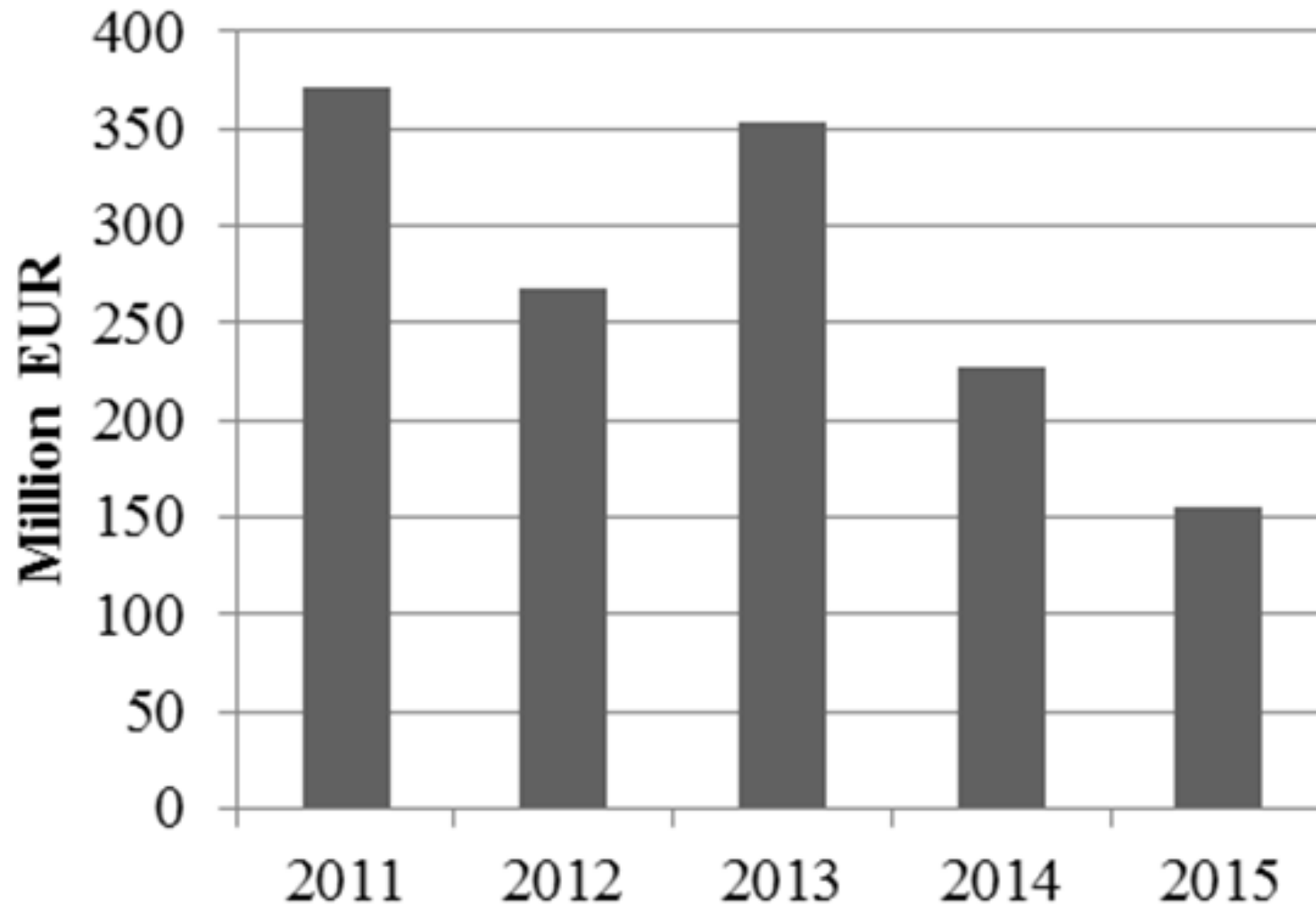
# + 需給調整市場で取引された インバランス量の推移



(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と  
再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)



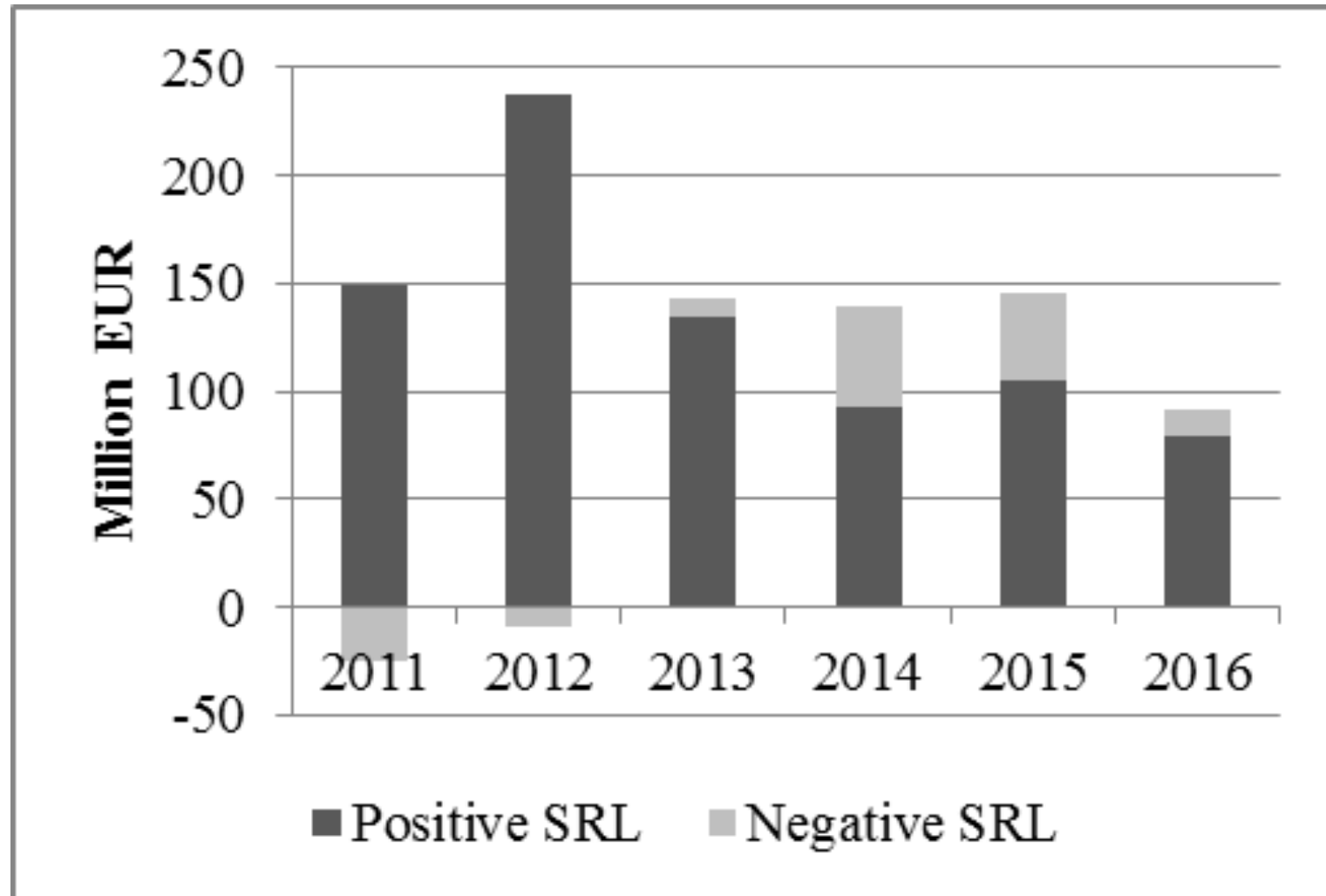
# + TSO間の協調による調達予備力の削減



(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)



# + TSO間の協調による応動予備力の削減

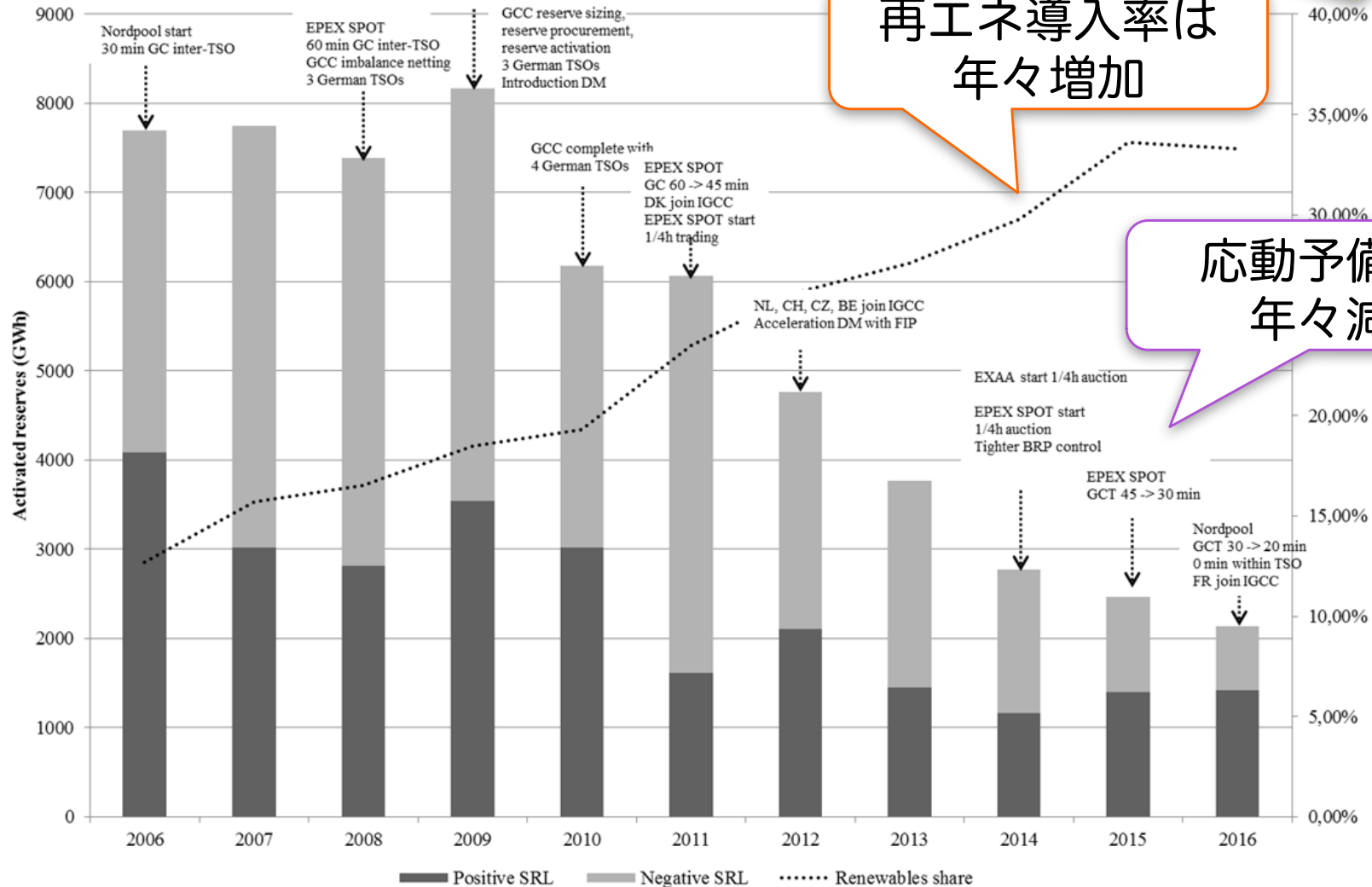


(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)



# + 再エネ大量導入でも調整力は少なく て済む (ドイツの実例)

再掲



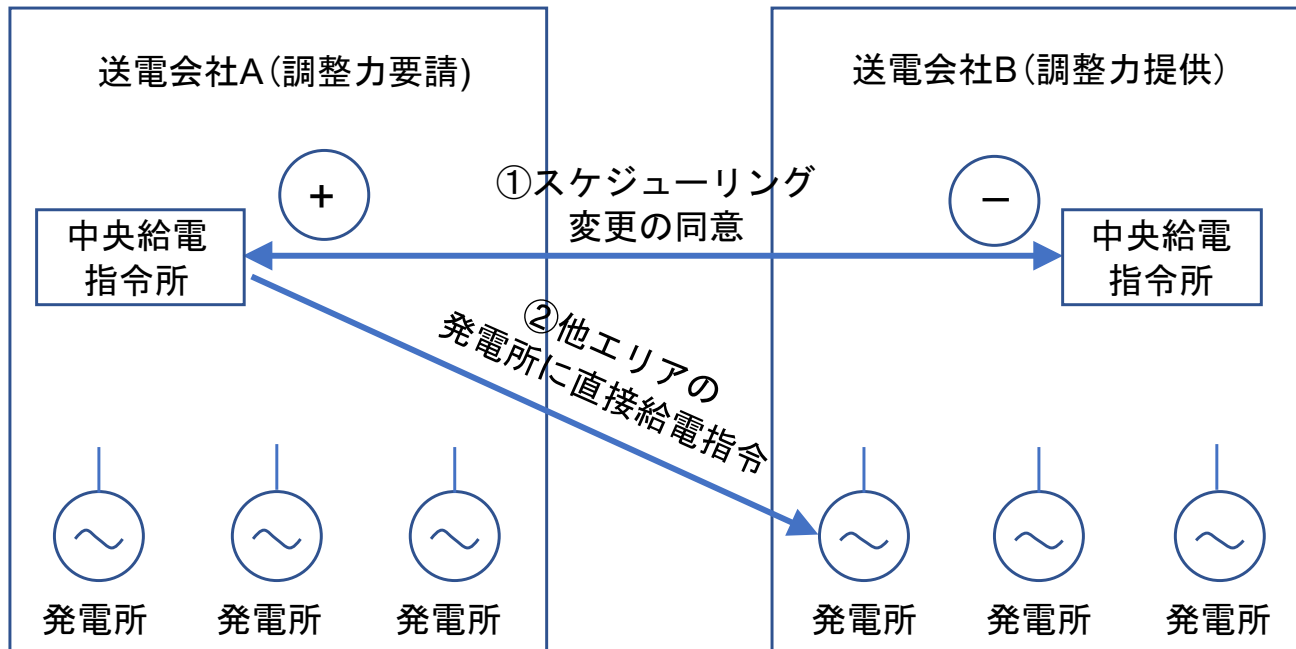
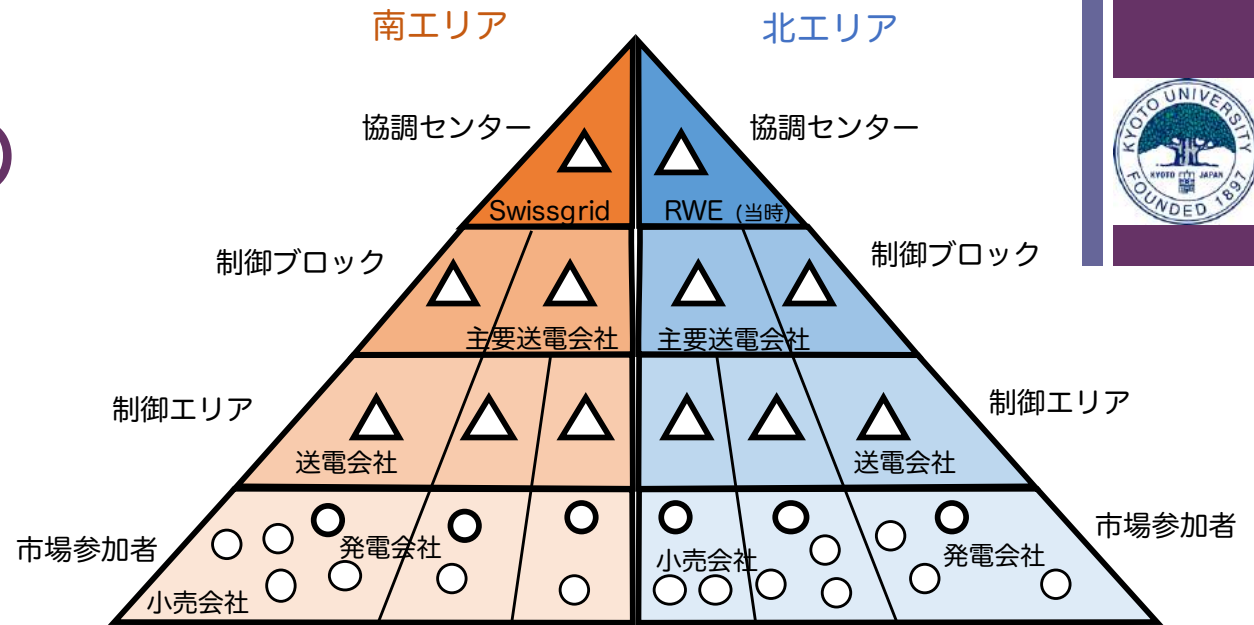
再エネ導入率は年々増加

応動予備力は年々減少

(出典) 安田・桑畑:ドイツ需給調整市場の市場取引分析と再生可能エネルギー大量導入 ~日本への示唆~, 電気学会合同研究会 (2018.6)



# + 国を超えた送電会社間の協調



(出典) 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ~ 電力システム編, インプレス R&D (2018)



# + 通信プロトコルの統一

## ■ 欧州

- IEC 60870-6
- 国同士で言語が異なっても通信プロトコルは同一。

## ■ 北米

- TASE-2: 米国電力中央研究所が開発
- IEC 60870-6に昇格 ← 米欧で規格統一は実は稀(?)

## ■ 日本

- 独自規格。
- 喋る言語が同じでも通信プロトコルは異なる。
- 2000年代にIEC 60870-6の導入が検討されるも進まず。

送電レベルでのスマート化  
が遅れている？

# + 目次

- 1. 欧州の電力市場の動向
  - 需給調整責任会社 (BRP) の役割
  - ジャーマンパラドックス
- 2. 欧州の系統運用の動向
  - 送電会社 (TSO) 間の協調
  - 動的線路定格 (DLR) の実用化
- 3. まとめ (日本への示唆)



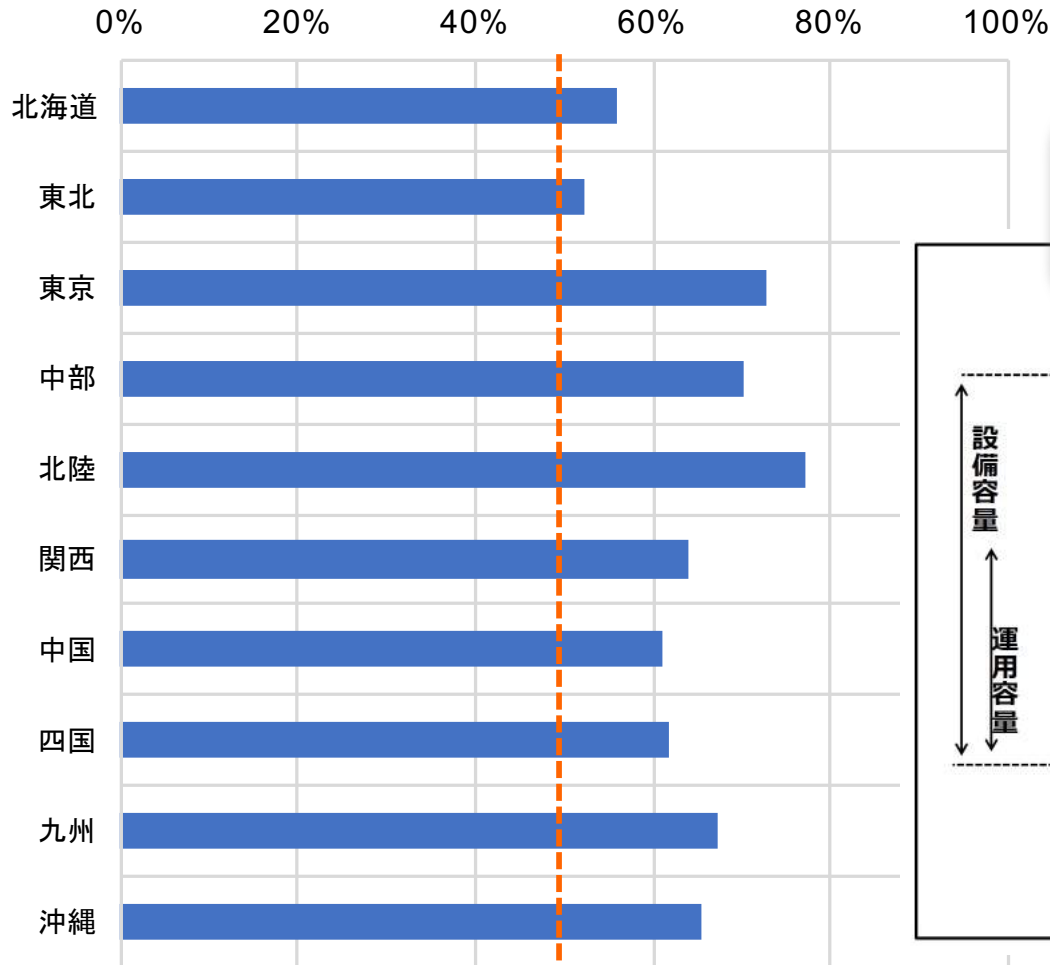
# + 系統運用に関する最新動向

- 日本の常識
  - 運用容量は設備容量(熱容量)の半分！  
(実際は設備容量60～80%の線路もあるが)
  - 「空容量ゼロ」の線路が多い
- 欧州の最新動向
  - 動的線路定格 (DLR: Dynamic Line Rating) の導入・実用化
  - 状況によっては熱容量の200%も利用可能。

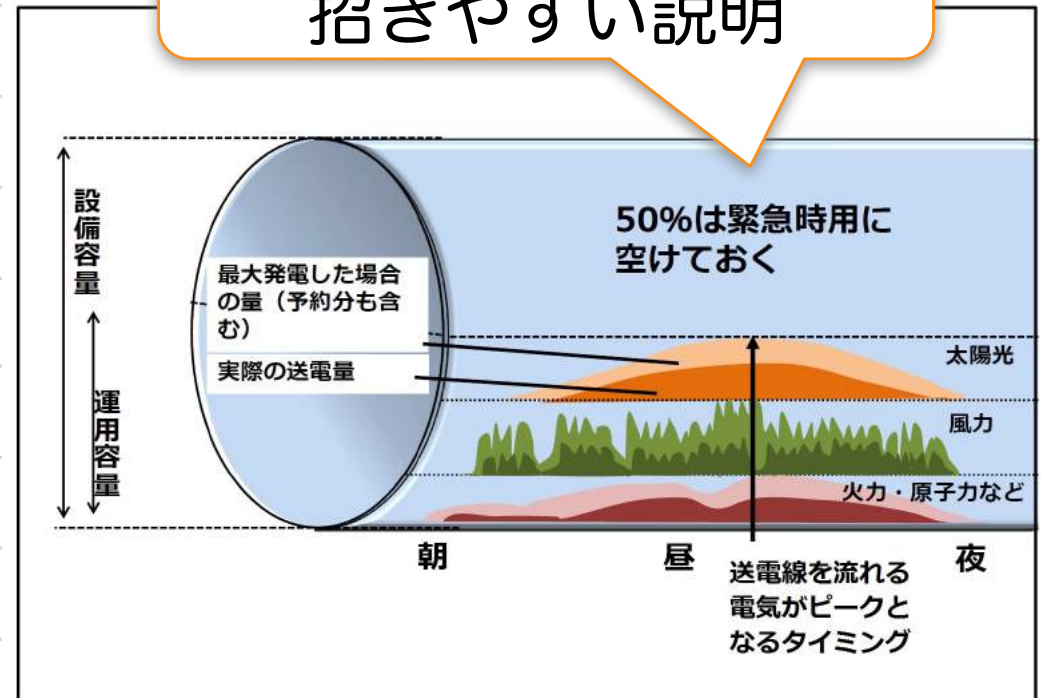


# + 日本では設備容量の50%が最大？

設備容量に対する運用容量の比率 (%)



わかりやすいが誤解を招きやすい説明

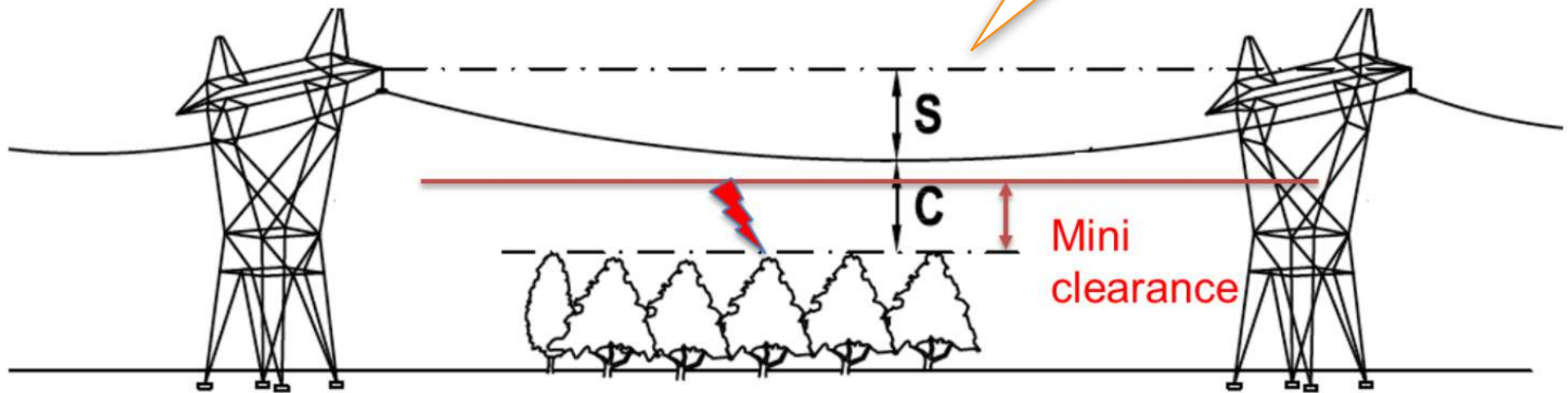


(出典) 経済産業省資源エネルギー庁: スペシャルコンテンツ: 送電線「空き容量ゼロ」は本当に「ゼロ」なのか? ~再エネ大量導入に向けた取り組み, 2017年12月26日  
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/akiyouryou.html>  
 (出典) 安田: 送電線空容量問題、その後のその後, 京大再エネ講座コラム (2018.6.7)

# + 熱容量以上の電流を流すと 送電線はどうなる？

- 1. 切れる。
- 2. 溶ける。
- 3. 垂れる。

弛度 (ちど)





## + 弛度(ちど)と電流容量

### ■ 従来 (日本)

- 電技解釈66条
- 引張荷重の安全率を2.2~2.5と規定
- 電線を施設する地方の平均温度で計算

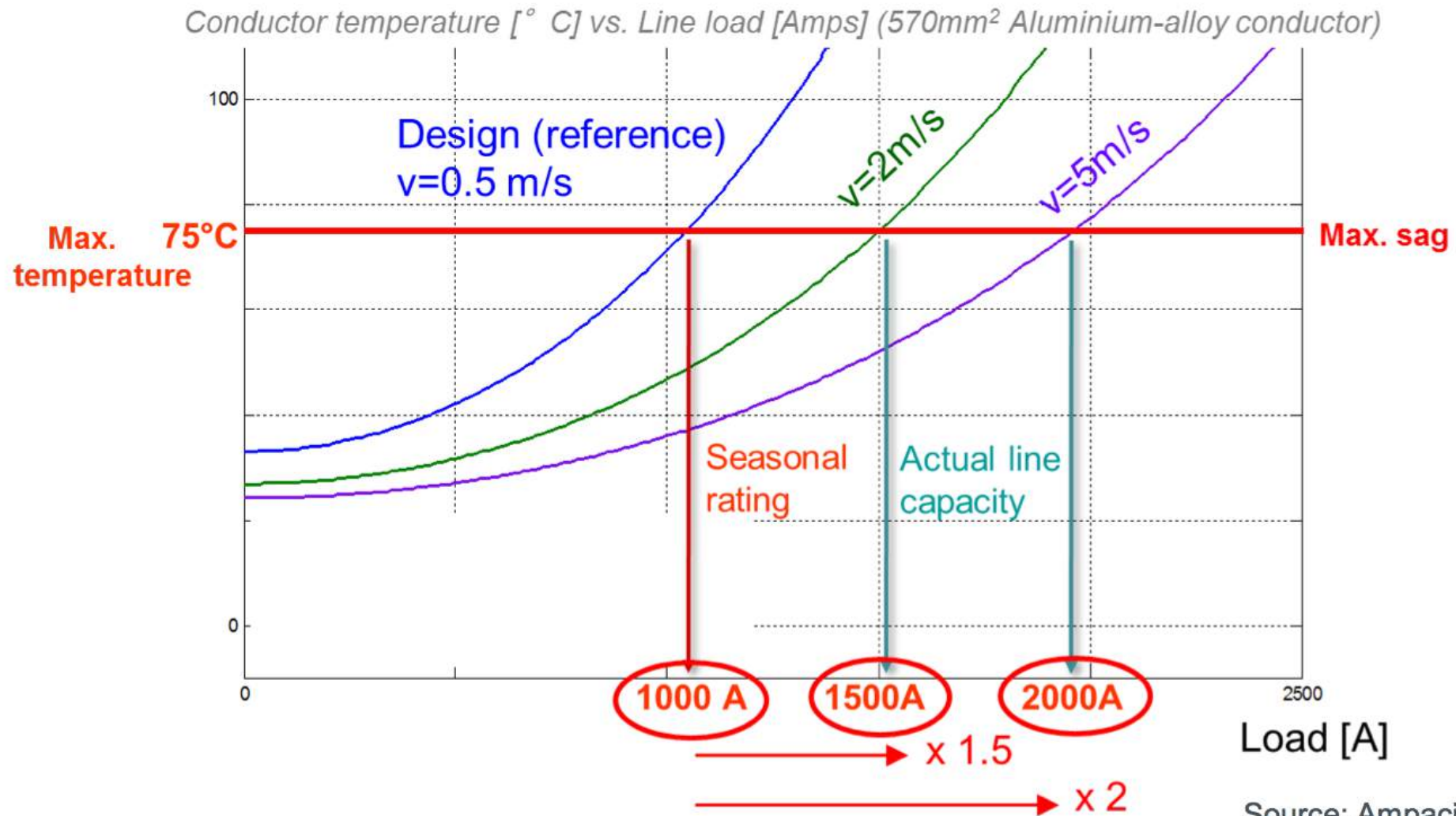
### ■ 欧州

- 動的線路定格 DLR:  
Dynamic Line Rating を採用
- センサと通信装置で  
リアルタイムの弛度を計測
- 風速や雰囲気温度によって電流容量が変動





# + DLR による電流容量の増加



Source: Ampacimon

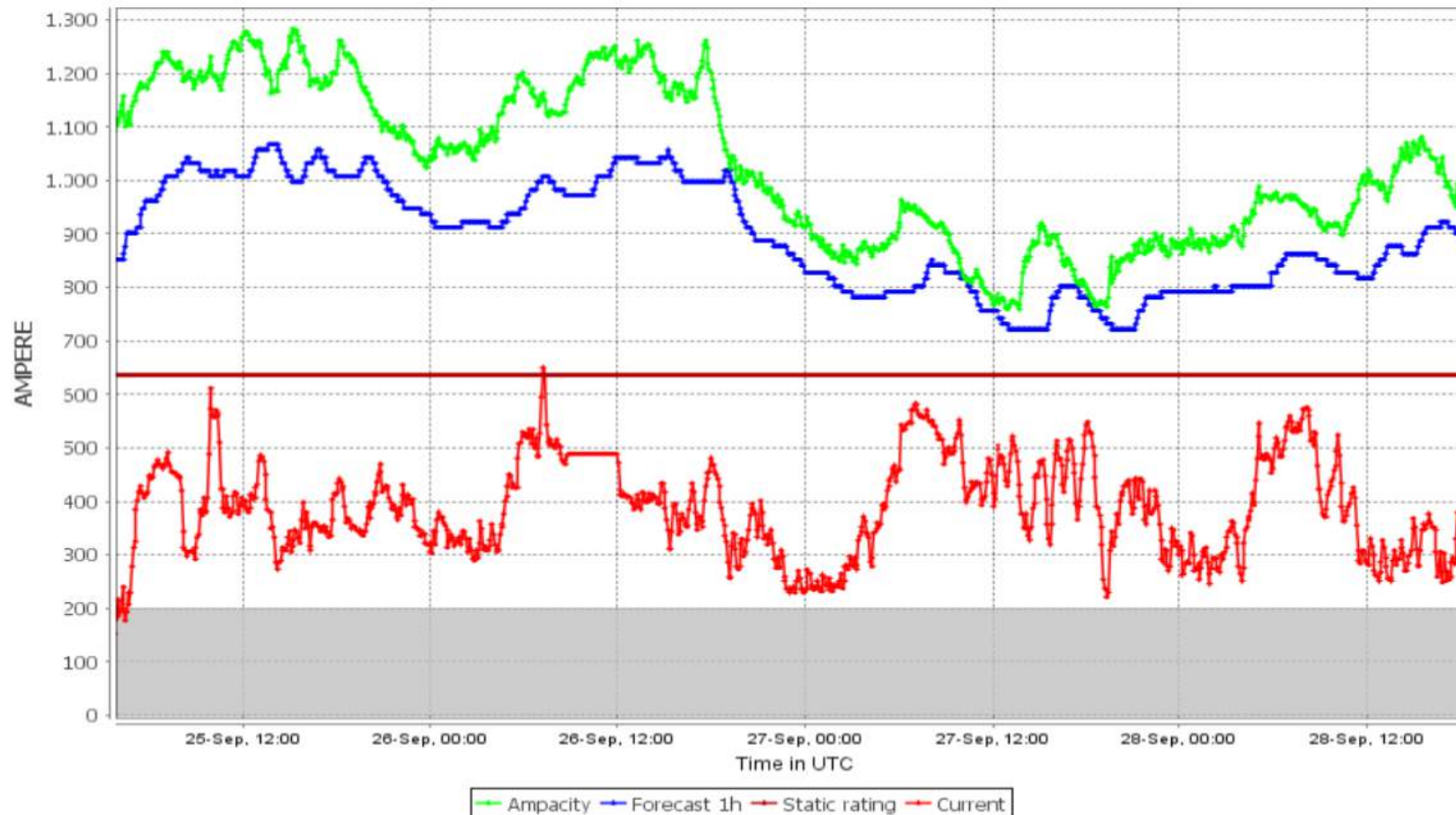
(出典) 桑畑玲奈: Eria Grid International as an International Pioneer, 京大再工ネ講座研究会 (2017.4)



# + ベルギーでのDLR導入例

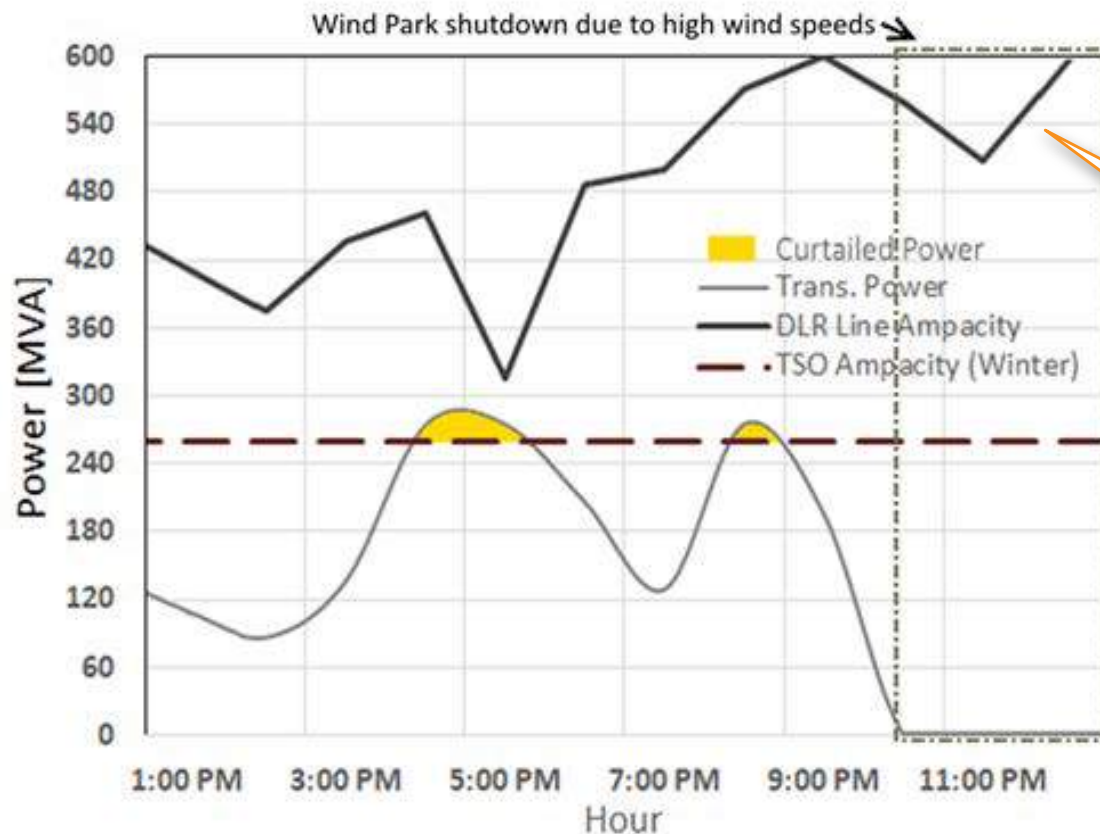
## Line ampacity and forecast - Line ELIA\_150.15

Period: from 2012-09-01T00:00:00.000Z to 2012-09-30T00:00:00.000Z





# + ポルトガルでのDLR導入例



系統運用と  
IoT技術の  
融合

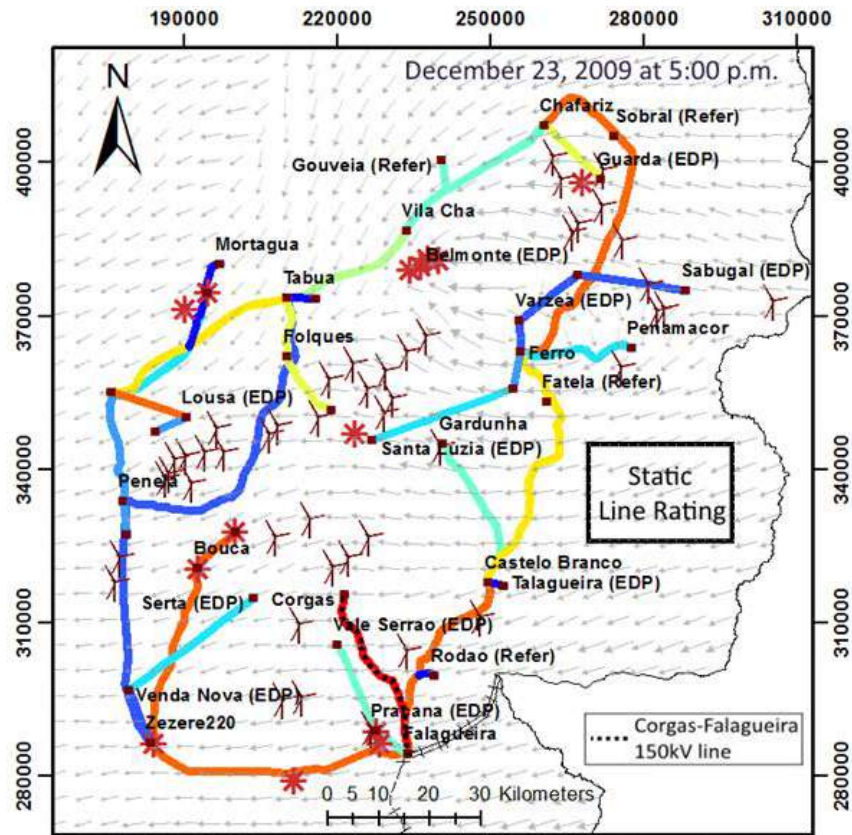
(出典) A. Estanqueiro: DLR Use for Optimization of Network Design with Very Large Wind (and VRE) Penetration, 17<sup>th</sup> Wind Integration Workshop (2018)

Line Code	1089	2164	2170	2173
TSO's STR capacity [MVA]	153	804	434	434
DLR capacity [MVA]	256	1872	728	535
Increase ampacity [%]	67%	133%	68%	23%
Wind Speed [m/s]	8.2	9.1	8.6	4.1
Angle Direction [°]	1	79	8	3

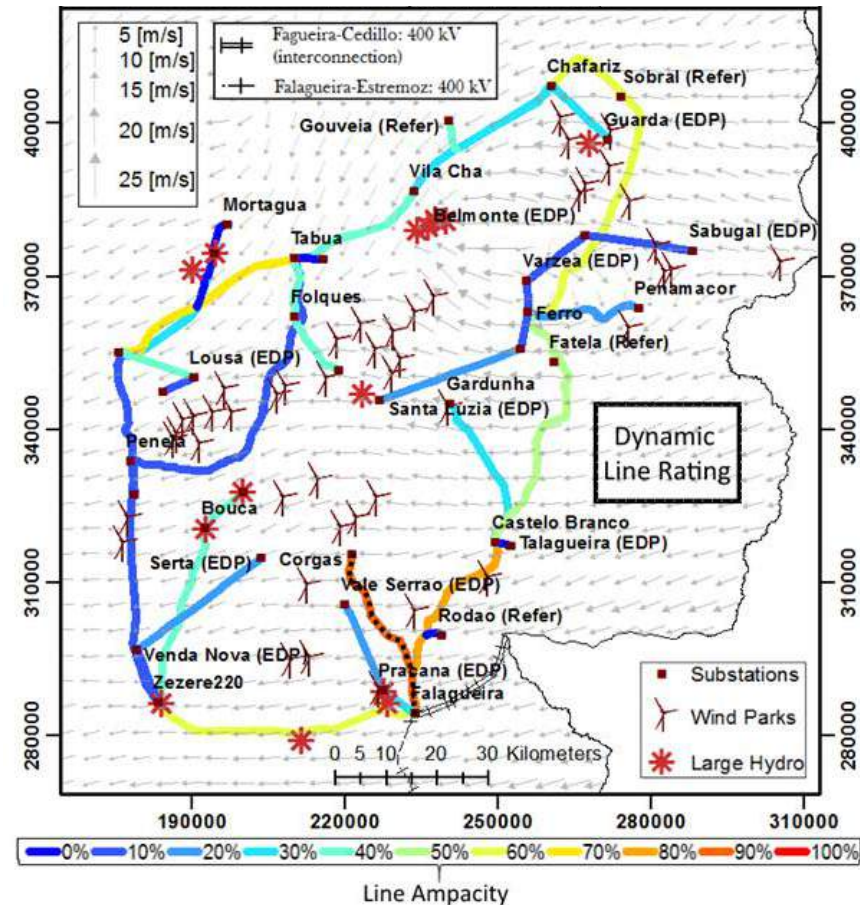




# ポルトガルでのDLR導入例



without DLR



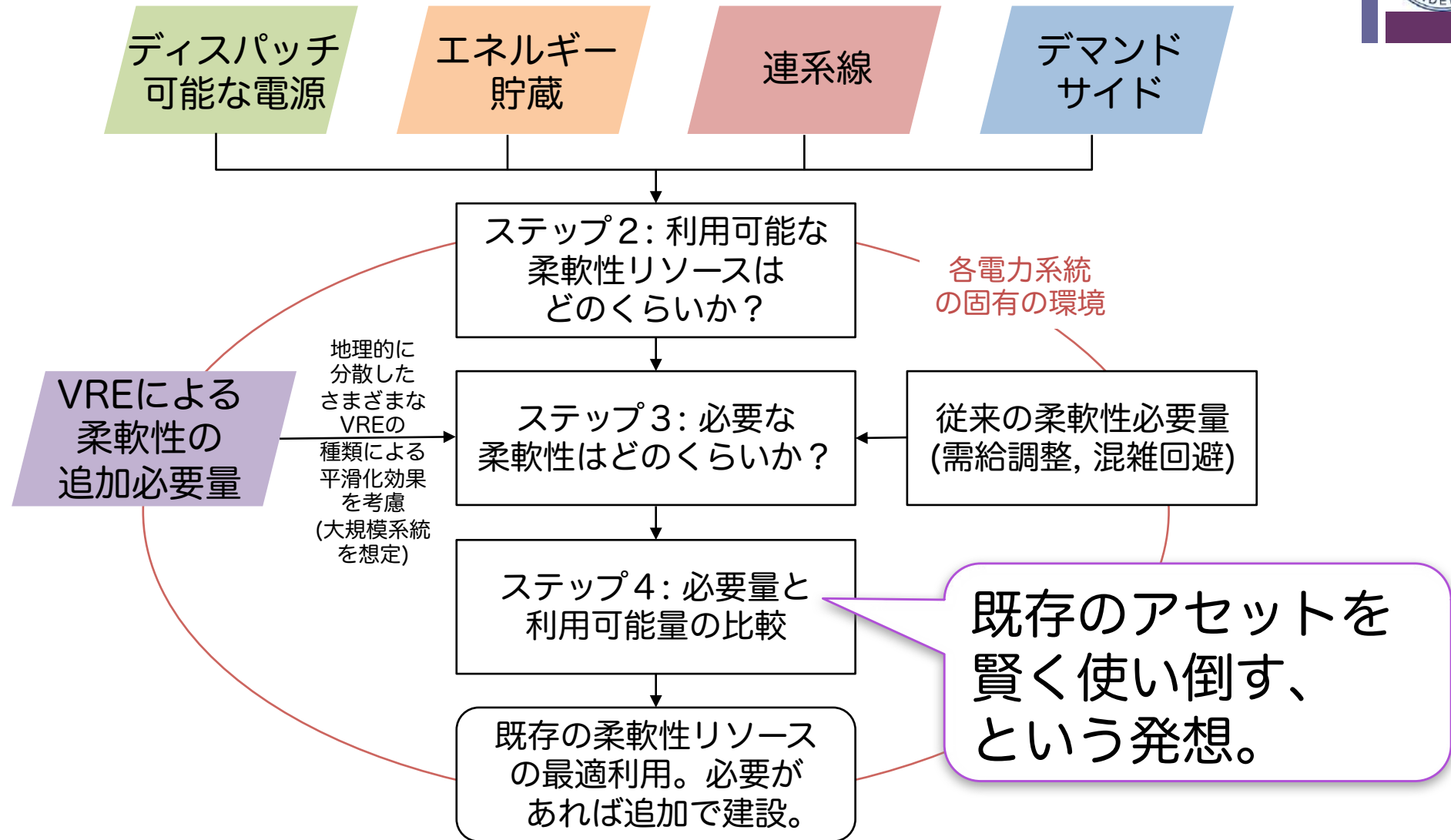
with DLR

(出典) A. Estanqueiro: DLR Use for Optimization of Network Design with Very Large Wind (and VRE) Penetration, 17<sup>th</sup> Wind Integration Workshop (2018)



# + 合理的な系統柔軟性の選択

## ステップ1: 柔軟性リソースの特定



# + 目次



- 1. 欧州の電力市場の動向
  - 需給調整責任会社 (BRP) の役割
  - ジャーマンパラドックス
- 2. 欧州の系統運用の動向
  - 送電会社 (TSO) 間の協調
  - 動的線路定格 (DLR) の実用化
- 3. まとめ (日本への示唆)

## + まとめ（日本への示唆）

- IoT技術の送電分野への応用
  - 自律制御 🖱️ 市場シグナル連動
  - センシング 🖱️ 動的線路定格 DLR
  - 通信プロトコルの統一 🖱️ TSO間協調
- 経済運用/市場設計
  - 既存アセットを賢く使い倒す
  - 需給調整を市場で「民主的に」管理
  - 市場プレイヤーの育成





# 欧州電力システムを巡る 最新動向

ご静聴有難うございました。

[yasuda@mem.iee.or.jp](mailto:yasuda@mem.iee.or.jp)

京都大学  
再生可能エネルギー  
講座  
第2期  
第1回研究会  
(部門A)

