



JPEA-京都大学
共催シンポジウム

2021年3月17日

分散型電源と配電網

～地域から考える再エネ大量導入と脱炭素～



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. 分散型電源とはなにか？ (用語の定義)
 - 送電/配電
 - 高圧/低圧
 - 分散型電源

- 2. 分散型電源 (=再生可能エネルギー) の課題
 - 需給調整は誰が行うか？
 - 電圧調整は誰が行うか？
 - 費用便益分析は誰が行うか？

- 3. まとめ



高圧と低圧，送電線と配電線

- 電気設備技術基準による交流電圧の区分

区分	定義
低圧	600 V 以下
高圧	600 V を超え 7 kV 以下
特別高圧	7 kV を超えるもの

- 電気事業法施行規則による電線路の区分

区分	定義 (抜粋)
送電線路	変電所相互間，発電所と変電所との間の電線路
配電線路	変電所と需要家設備との間の電線路



+ 配電線の定義



区分	「電気事業法施行規則」による定義 (抜粋)
送電線路	変電所相互間，発電所と変電所との間の電線路
配電線路	変電所と需要家設備との間の電線路

用語	JEAC 9701-2019「系統連系規定」による解説 (抜粋)
低圧配電線	不特定多数の低圧需要家に電力を供給する低圧の配電線のこと。一般に、単相2線式：100 V、単相3線式：100/200 V、三相3線式：200 V、及び三相4線式：100/200 Vの方式がある。
高圧配電線	高圧需要家に電力を供給する役割と配電用変電所から柱上変圧器等を介して低圧需要家に電力を供給するまでの送電を行う役割を兼ねた高圧の配電線のこと。方式としては三相3線式：6,600 Vが一般的である。
特別高圧配電線路	特別高圧需要家に電力を供給する役割と変電所まで電気を送電する役割を兼ね備えた7 kVを超える特別高圧電線路のこと。なお、電圧が35 kV以下の場合には、配電線扱いとすることもある。

参考情報: 海外では“transmission/distribution line”の明確な定義がなかなか見あたらず、例えばIEC 60050-617 (IEV) に、“transmission line: a line which is part of an electric power transmission system”, “distribution line: overhead line which is used for the distribution of electricity”などと曖昧に定義される程度。

なお、海外のDSO(配電系統運用者)の管理する電圧階級は、例えばスペイン・英国は132kV以下、ドイツ・アイルランドは110kV以下、デンマーク・ポルトガルは60kV以下、フランスは20kV以下と、国によってまちまちであることに注意。

Eurelectric: Power Distribution in Europe Facts & Figures (2013) を参考のこと。



日本の主な一般送配電事業者の 電圧階級



北海道電力 NW	東京電力 PG	関西電力 送配電	九州電力 送配電	電圧 区分	線路 区分
—	(1,000 kV)	—	—	特別 高圧	送電 線
—	500 kV				
275 kV		200 kV			
187/110 kV	154 kV		110 kV		
66 kV		77 kV	66 kV		
33/22 kV	22 kV	33/22 kV	22 kV		
6.6 kV		6 kV		高圧	配電 線
200 V				低圧	
100 V					

日本と海外の 電圧階級の違いについて

※ 3 相交流の場合



電圧階級	日本 ^{注1}	海外 ^{注2}
超高压 UHV (ultra high voltage)	(187 kV以上) ^{注3}	245 kV超
特別高压	7 kV超	—
高压 HV (high voltage)	600 V超～7 kV	35 kV超～230 kV
中压 MV (medium voltage)	—	1 kV超～35 kV
低压 LV (low voltage)	600 V以下	100～1000 V

注1: 「電気設備に関する技術基準を定める省令」(電技)で規定。

注2: IEC 60038:2009 Ed. 7.0 “IEC standard voltages” で規定。ただし、同規格では電圧階級の区分が規定されているだけで、LV, MV, HV, UHVの呼称は用いられていない。

注3: 電技では規定されない。カッコ内の数値は『電力エネルギー時事用語事典』などによる定義(参考)。



欧州主要国の配電系統事業者(DSO)が管轄する電圧階級



電圧階級[kV]	低圧LV	中圧MV							高圧HV						
		6	10	11	15	20	30	33	38	45	60	66	110	132	150
ドイツ	○		○		○	○							○		
デンマーク	○										○				
スペイン	○			○	○	○	○			○		○	○	○	
フランス	○					○									
アイルランド	○		○			○			○				○		
イタリア	○					○									*
ポルトガル	○	○	○		○		○				○				
英国	○			○					○					○	
(参考) 日本の定義	低圧	高圧			特別高圧										

(参考) Eurelectric: Power Distribution in Europe Facts & Figures, a EURELECTRIC paper (2013) より抜粋して筆者まとめ

分散型電源の定義 (日本)



文献名	定義	用例	定義(説明)文
電気事業法	×	×	——
電気事業法施行規則	×	×	——
電気設備に関する技術基準を定める省令	×	×	——
電気設備の技術基準の解釈	×	×	——
電気設備の技術基準の解釈の解説	×	×	——
電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン	×	○	——
JEC-2470:2017 分散形電源系統連系用電力変換装置	○	○	分散(形)電源(システム) 中規模で、需要家の近くに設置する発電システム及び電気エネルギー貯蔵システム
JEAC 9701-2019 系統連系規程	△	○	電気事業法(昭和39年法律第170号)第38条第4項四号に掲げる事業を営むもの以外のものが設置する発電設備の総称を分散型電源として扱う。
IEEE電気・電子用語辞典	×	×	——
電気工学ハンドブック第7版	×	○	——
電気事業事典	○	○	従来より電力供給の中心的役割を果たしてきた大規模集中型電源に対して、需要地に近接して分散配置される小規模電源の総称
電力エネルギー時事用語事典 2012年版	○	○	電源需要地近傍に分散して配置される小規模な電源のこと。

分散型電源の定義 (海外)



文献名	定義	用例	定義文
IRENA: Rethinking Energy	○	○	Distributed Generation: Electricity generating facilities that are small (typically less than 1 MW) and located close to where the electricity is consumed.
IEC 60050-617	○	×	Distributed Generation: generation of electric energy by multiple sources which are connected to the power distribution system
Directive (EU) 2019/944	○	○	'distributed generation' means generation plants connected to the distribution system
EIA Glossary	○	×	Distributed generator: A generator that is located close to the particular load that it is intended to serve. General, but non-exclusive, characteristics of these generators include: an operating strategy that supports the served load; and interconnection to a distribution or sub-transmission system (138 kV or less).



分散型電源の定義 (の課題)

- 日本語では明確な定義や合意形成は途上
 - 実は、法令や学会でしっかりと定義されていない！
 - 従来型電源(集中型電源)に対して劣位に置かれる？
- 国際議論:
 - 需要地近接は必要条件か？
 - 発電機容量？ 電圧階級？
 - 配電系統 (distribution system) の定義は？
- 暫定定義 (安田(2021)による)
 - 概ね140 kV未満の電圧階級の線路(日本では66~77 kV級以下の電圧階級の線路)に接続される電源に接続される電源

新しい技術用語の定義が定着するのは時間がかかる。今後も合意形成が必要。

■ (出典) 安田陽: 地域分散型エネルギーと系統連系問題, 大島堅一編著: 「炭素ゼロ時代の地域分散型エネルギーシステム」(仮題), 日本評論社 (2021年春出版予定)



目次



- 1. 分散型電源とはなにか？ (用語の定義)

- 送電/配電
- 高圧/低圧
- 分散型電源

- 2. 分散型電源 (=再生可能エネルギー) の課題

- 需給調整は誰が行うか？
- 電圧調整は誰が行うか？
- 費用便益分析は誰が行うか？

- 3. まとめ



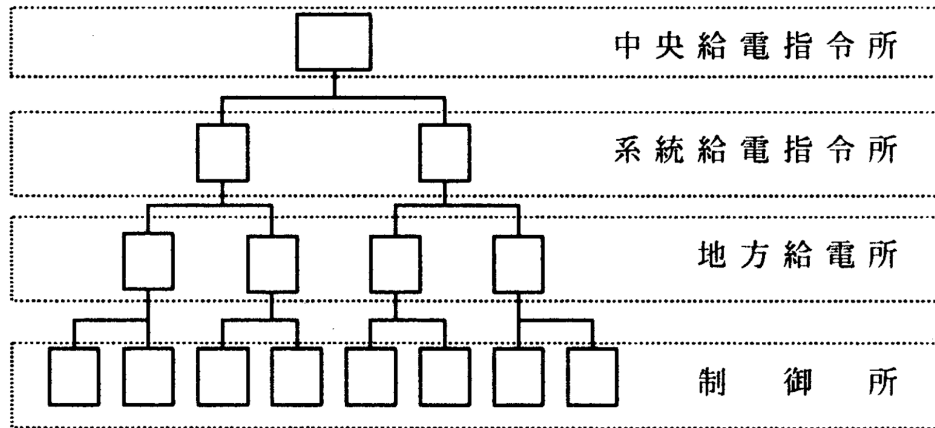
需給調整責任は誰が担うか？

- 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
- 欧州
 - **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。

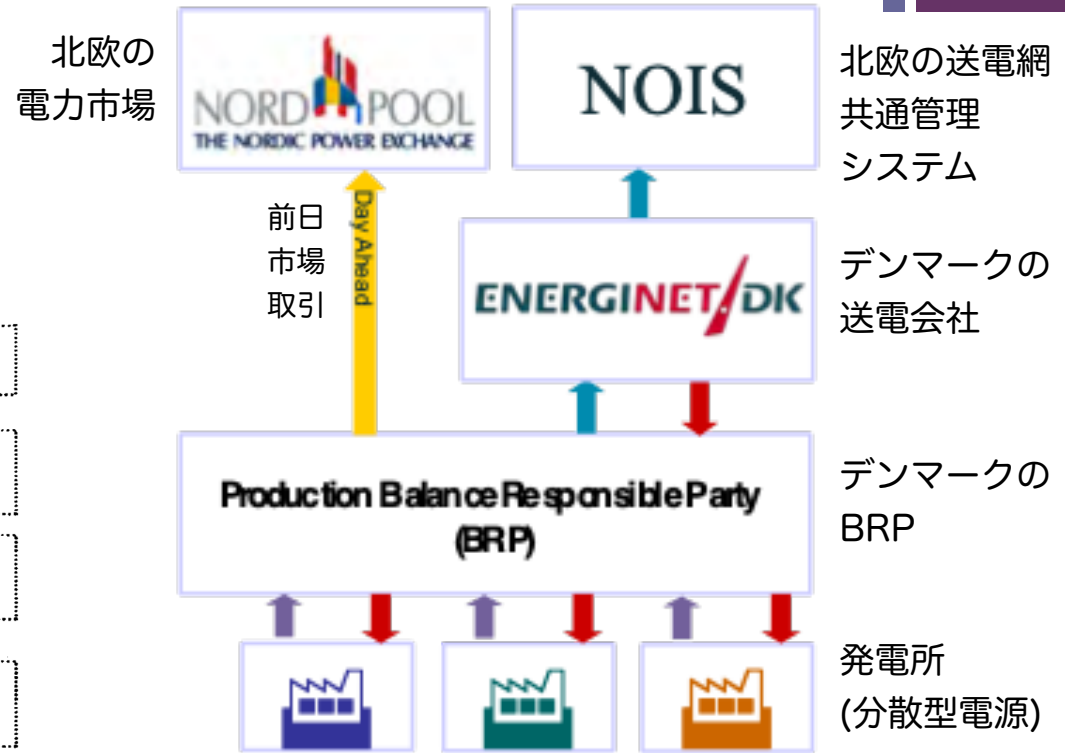
エネルギーの民主化！
…だけでなく、
需給調整も民主化！



需給調整責任は誰が担うか？



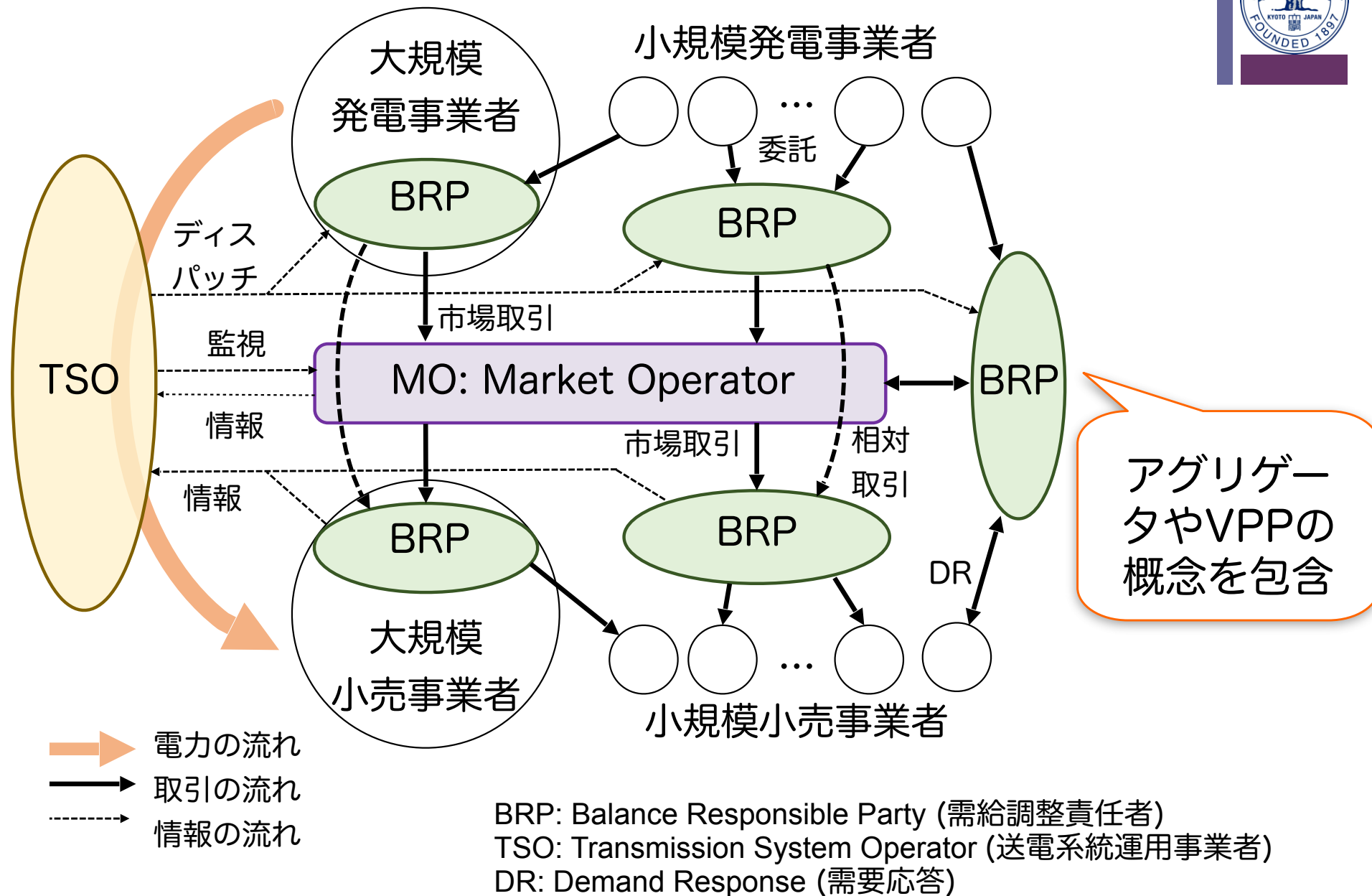
発送電分離前
(日本の例)



自由化市場
(デンマークの例)

(出典) 電気学会 給電用語の解説調査専門委員会: 給電用語の解説, 電気学会技術報告, No.994 (2004)
Energinet.dk: Cell Controller Pilot Project – Smart Grid Technology Demonstration in Denmark for Electric Power Systems with High Penetration of Distributed Energy Resources. 2011 Public Report (2011)

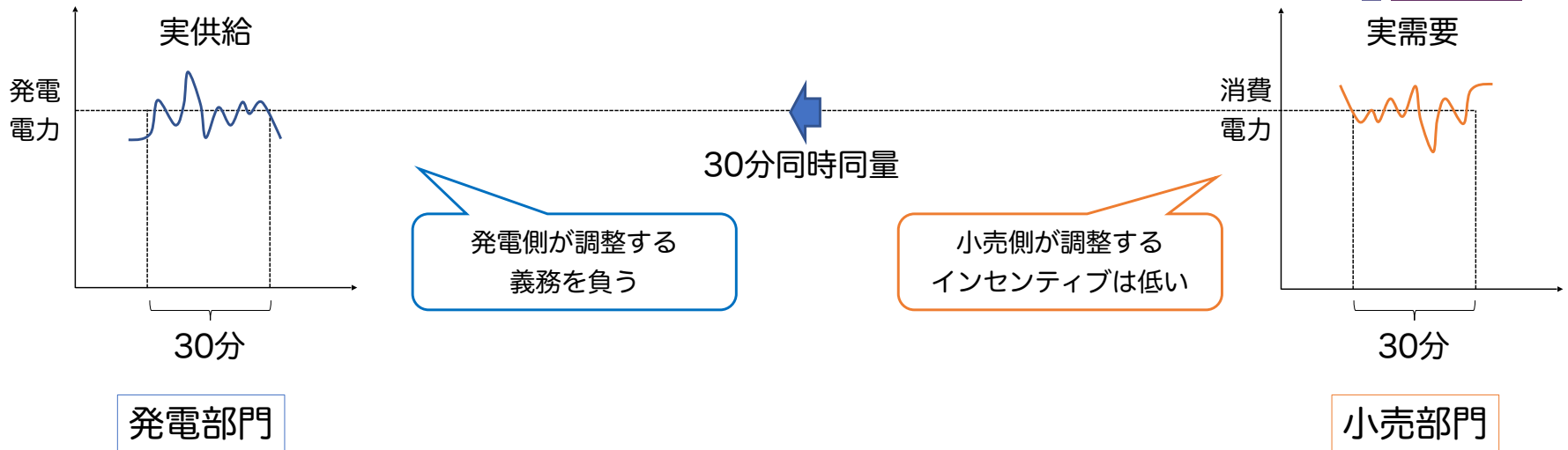
欧州におけるBRPの役割



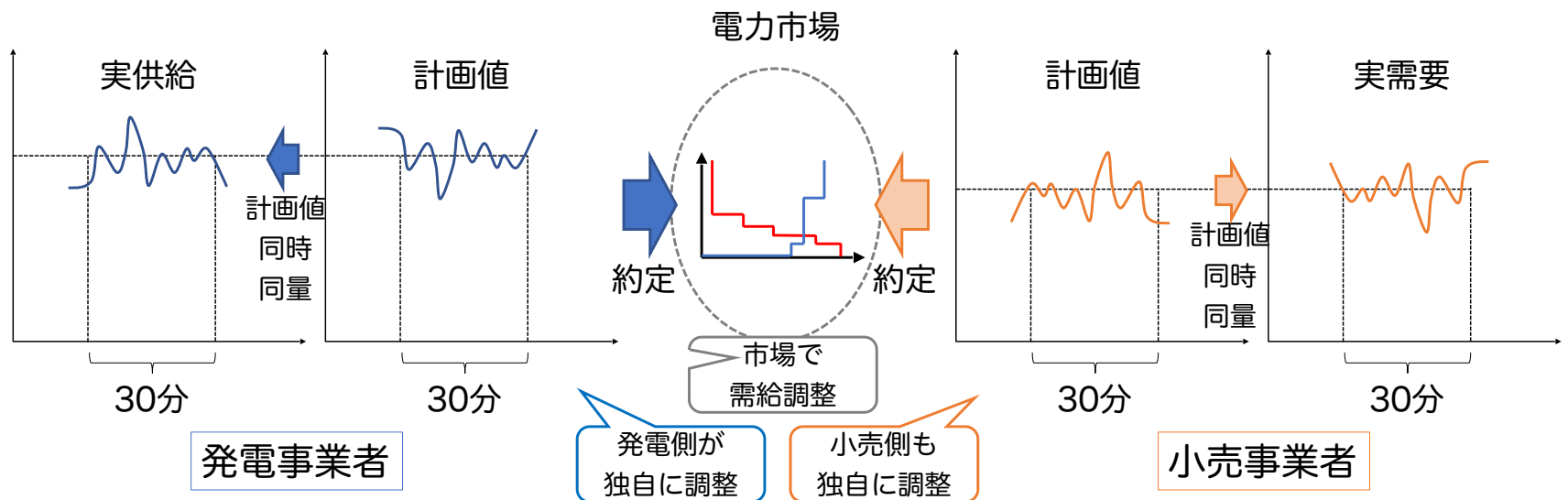
+

30分同時同量制度と 計画値同時同量制度

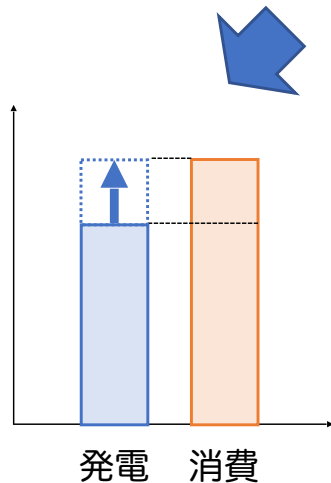
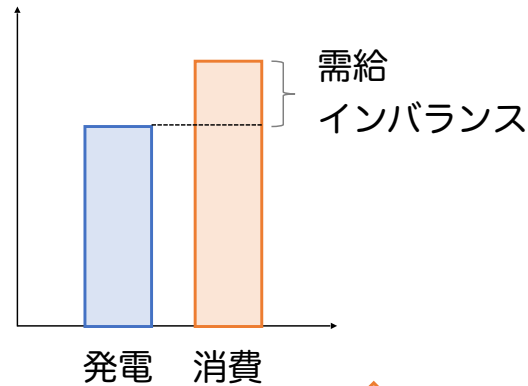
(a)
30分
同時同量
制度
(使用権
契約)



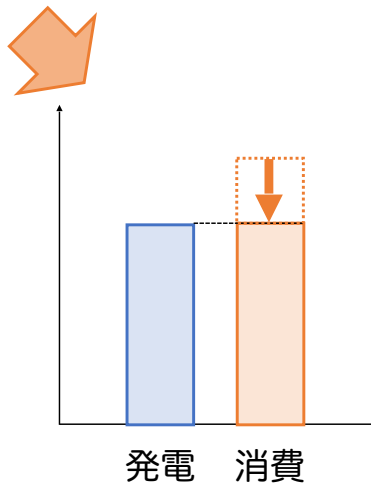
(b)
計画値
同時同量
制度
(確定数量
契約)



デマンドレスポンスとネガワット

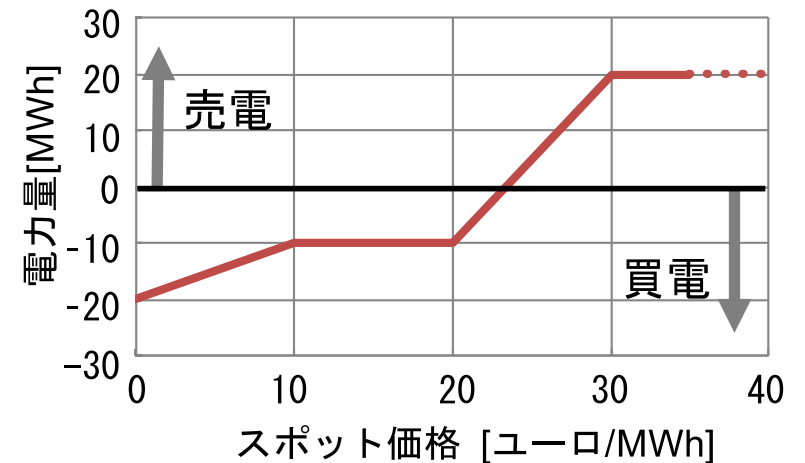


(a) 従来の考え方
(発電側を増やす)



(b) ネガワットの考え方
(消費側を減らす)

ネガワットの考え方



エネルギー貯蔵をもつ
需要家の価格応答の例
(デンマーク
熱貯蔵+コジェネ)



日本版ネガワットの課題



市場取引の概念がほとんどない…

→ 電気の流れ
→ 下げDRの流れ
→ お金の流れ
↔ 契約

類型	類型 1 ①	類型 1 ②	類型 2
需要抑制量調達の主体 (電気を得る)	小売電気事業者	小売電気事業者A (※)	一般送配電事業者 (系統運用者)
需要抑制量創出の主体 (電気を削減)	小売電気事業者と契約する需要家	小売電気事業者Xと契約する需要家	小売電気事業者と契約する需要家
取引の目的	計画値同時同量の達成	計画値同時同量の達成	需給バランス調整 (調整力としての活用)
取引のイメージ	<p>①卸供給 (電気の流れ) ②小売供給 (電気の流れ) ③下げDR供給 (下げDRの流れ) ④下げDR供給 (下げDRの流れ) 卸電力料金 (お金の流れ) 小売料金 (お金の流れ) 下げDR報酬 (お金の流れ)</p>	<p>①卸供給 (電気の流れ) ②小売供給 (電気の流れ) ③下げDR供給 (下げDRの流れ) ④インバランス供給 (電気の流れ) ⑤特定卸供給 (電気の流れ) 卸電力料金 (お金の流れ) 調整金 (お金の流れ) 小売料金 (お金の流れ) 下げDR報酬 (お金の流れ) 特定卸電力料金 (お金の流れ)</p>	<p>①卸供給 (電気の流れ) ②小売供給 (電気の流れ) ③下げDR供給 (下げDRの流れ) ④調整力供給 (電気の流れ) 卸電力料金 (お金の流れ) 調整金 (お金の流れ) 小売料金 (お金の流れ) 下げDR報酬 (お金の流れ) 調整力報酬 (お金の流れ)</p>

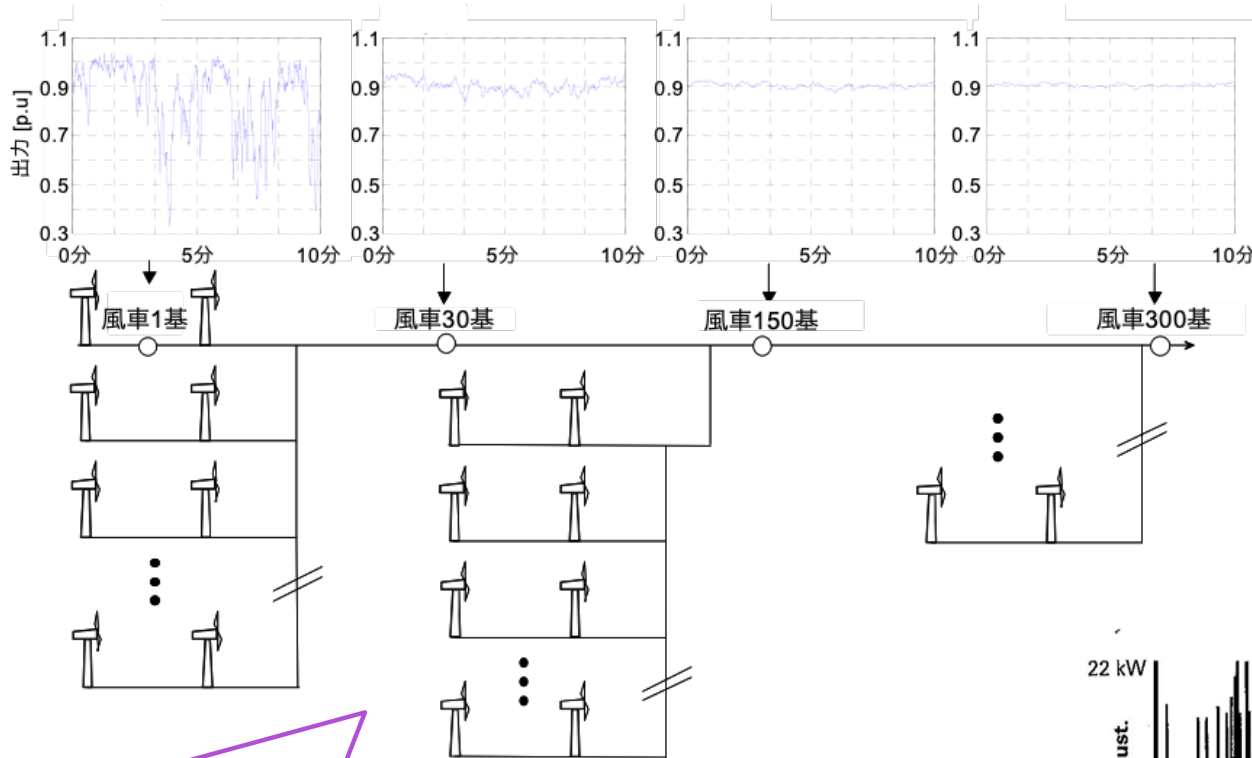
※小売電気事業者A社：需要抑制量調達の主体となる小売電気事業者とは別の事業者 (図を参照)

集合化 aggregation とは？



- 複数の電源方式, 広域に分散した発電所を
集めること
 - 技術的視点
 - 平滑化 (ならし効果)
 - 市場的視点
 - ポートフォリオの多様化
 - リスクの分散
- 日本版「アグリゲーター」 aggregator
 - VPP, DR, ネガワットの文脈で語られるが…
 - 何を集めたいのか？ 集めて何をしたいのか？
 - 市場取引の概念はそこにあるか？

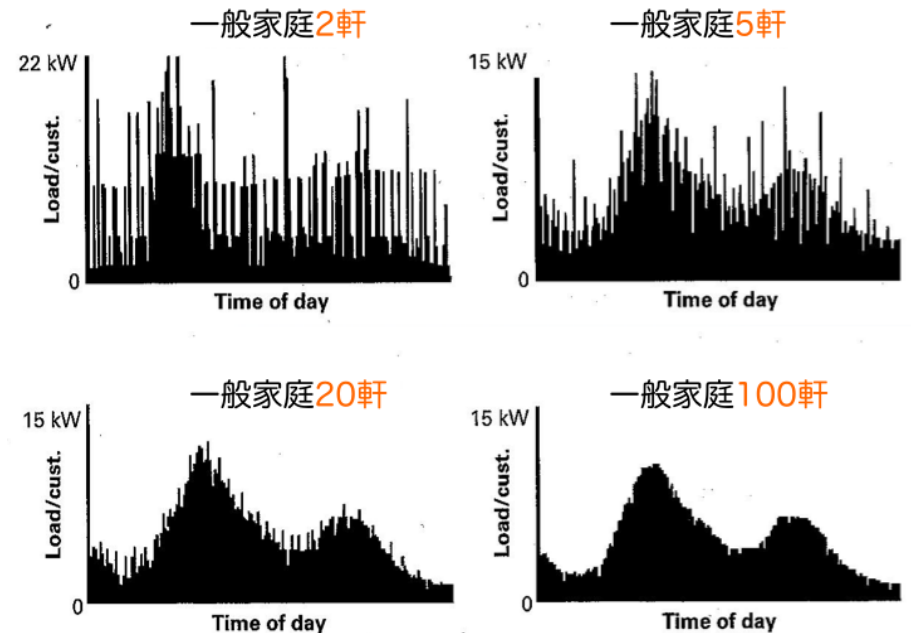
+ 集合化 aggregation のコンセプト



個々の風車で変動抑制するよりも、エリア全体で混ぜた方が合理的。

変動すれば直ちにアウト！ではなく、問題はその変動が既存の調整能力で管理できる範囲内にあるかどうか。

負荷変動の集合化は、電力系統の歴史以来ずっと行われてきている。



(出典) P. Rosas et al.: Dynamic Influence of Wind Power on the Power Systems, Technical University of Denmark (2004)

(出典) T. Ackermann: WWFジャパンセミナー「風力発電大量導入に向けての挑戦」, 2014

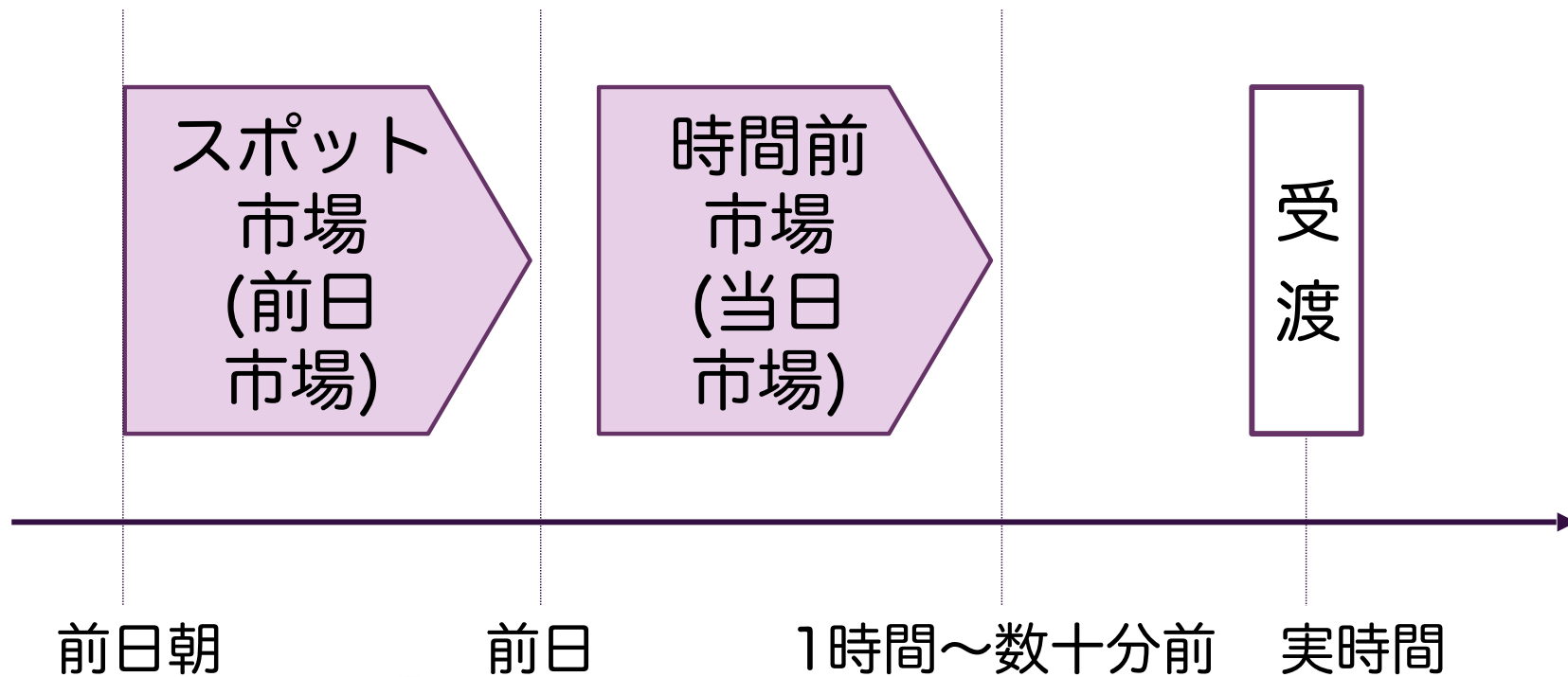


時間前市場は何のため？



複数の市場参加者同士の取引による調整のため

凡例:  民間市場



前日段階ではまだ予測誤差が大きい

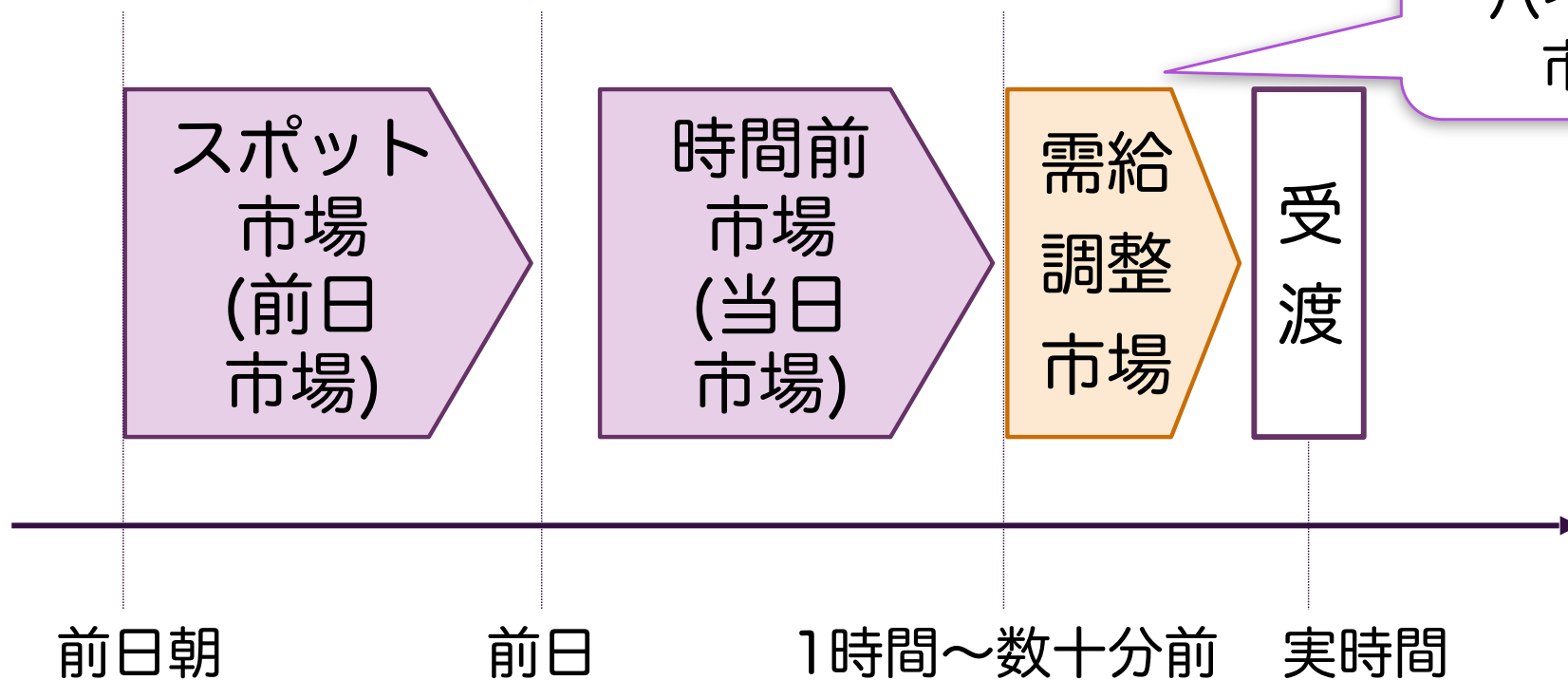


需給調整市場は何のため？

市場参加者同士の取引による調整後、なおも残る
インバランス・送電混雑の解消のため

凡例:  民間市場  系統運用者による市場

シングル
バイヤー
市場



市場参加者は送電混雑の情報を入手できない



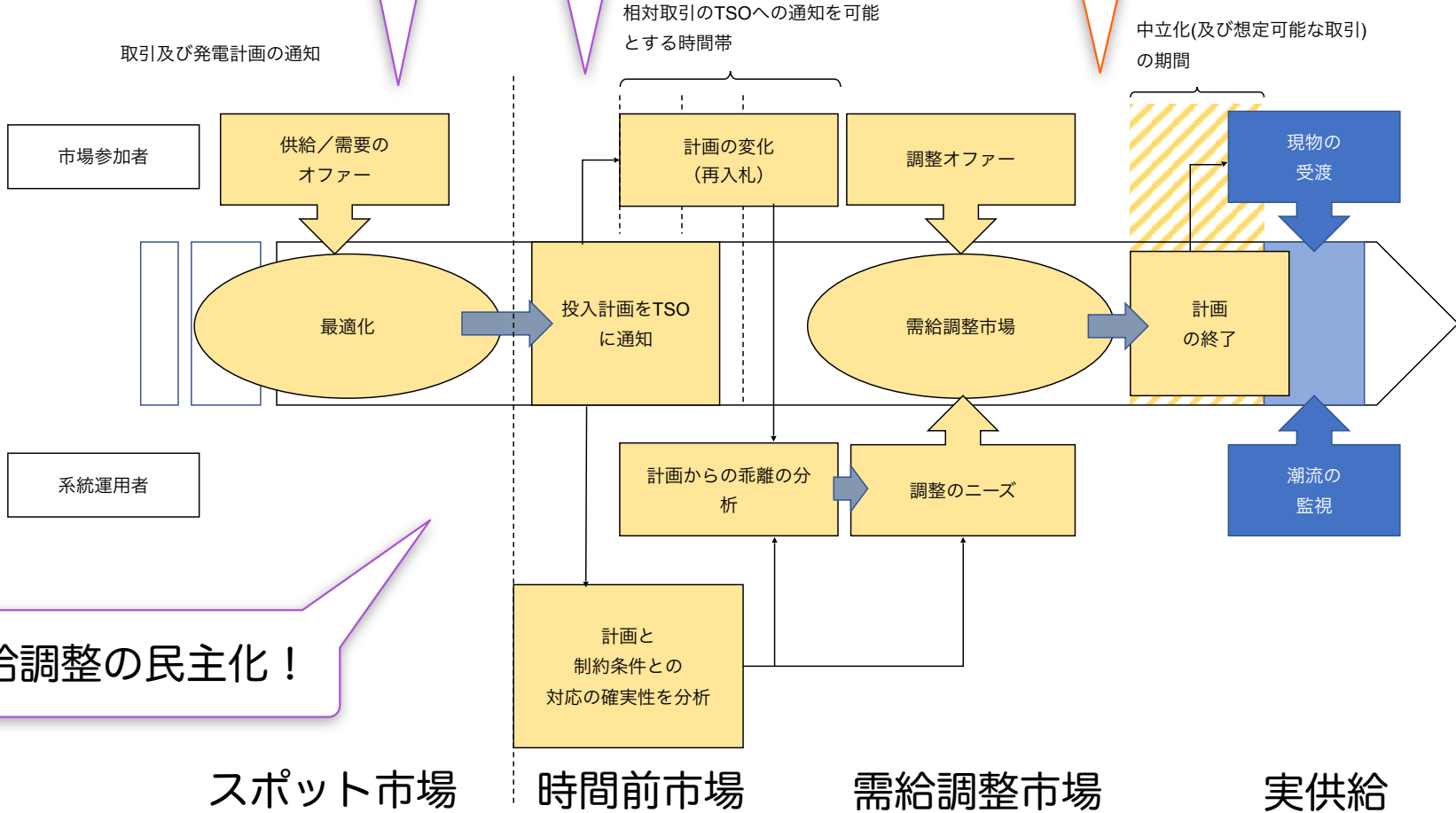
電力市場における意思決定



複数の市場プレイヤー
による意思決定

複数の市場プレイヤー
による意思決定(の調整)

送配電事業者
による最終意思決定



需給調整の民主化!

+ 系統柔軟性 flexibility

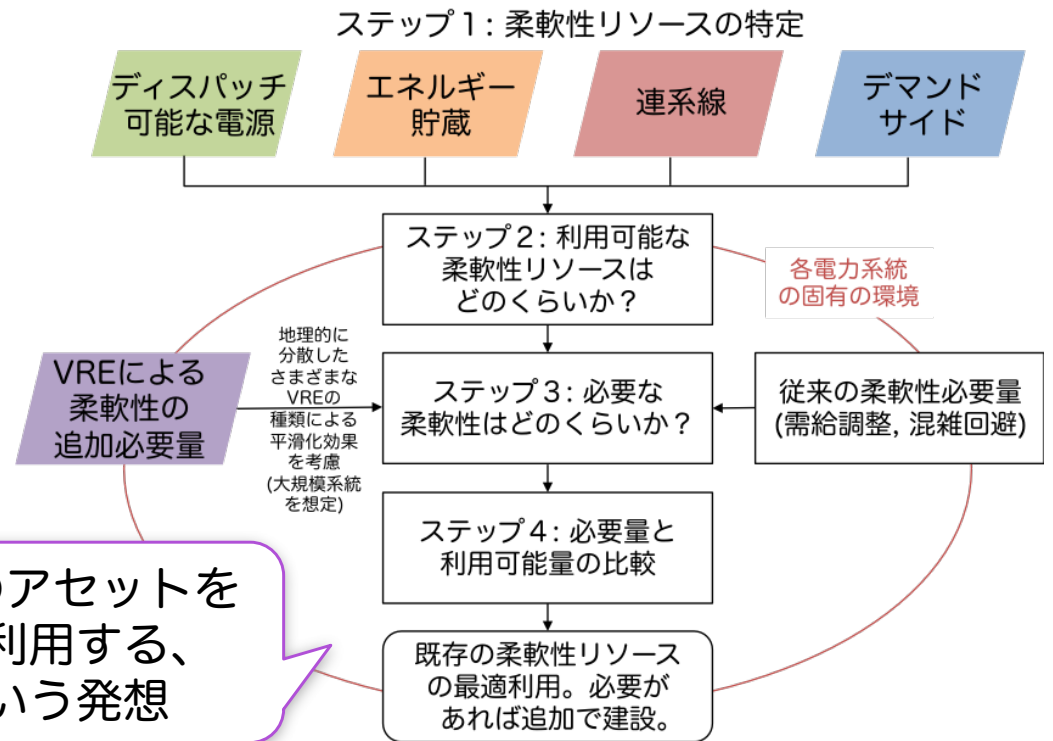
世界で活発に議論
(日本ではまだ?)



- 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。

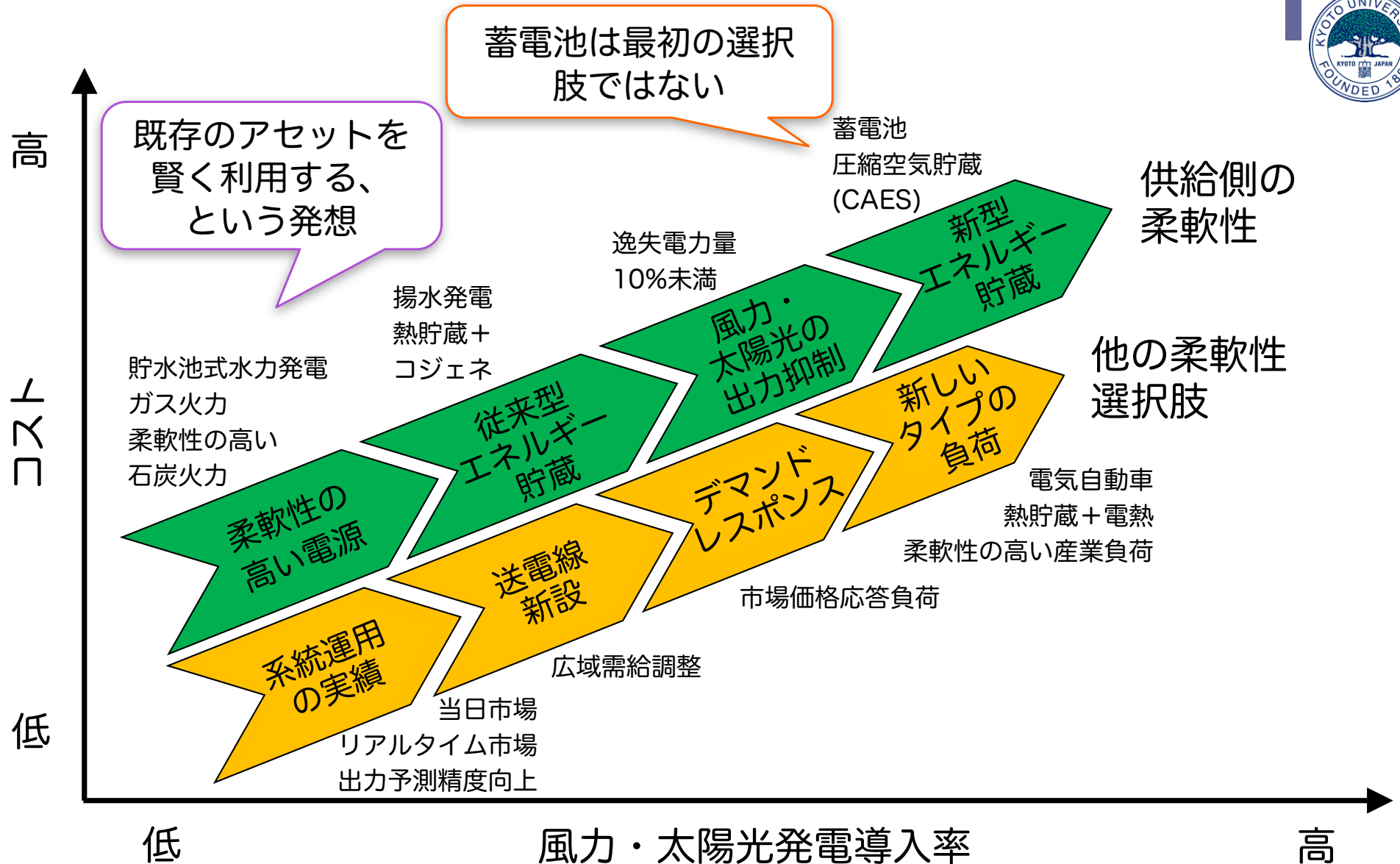
風力・太陽光を調整するのは
火力だけではない

- 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
 - 蓄電池
- 連系線
- デマンドレスポンス



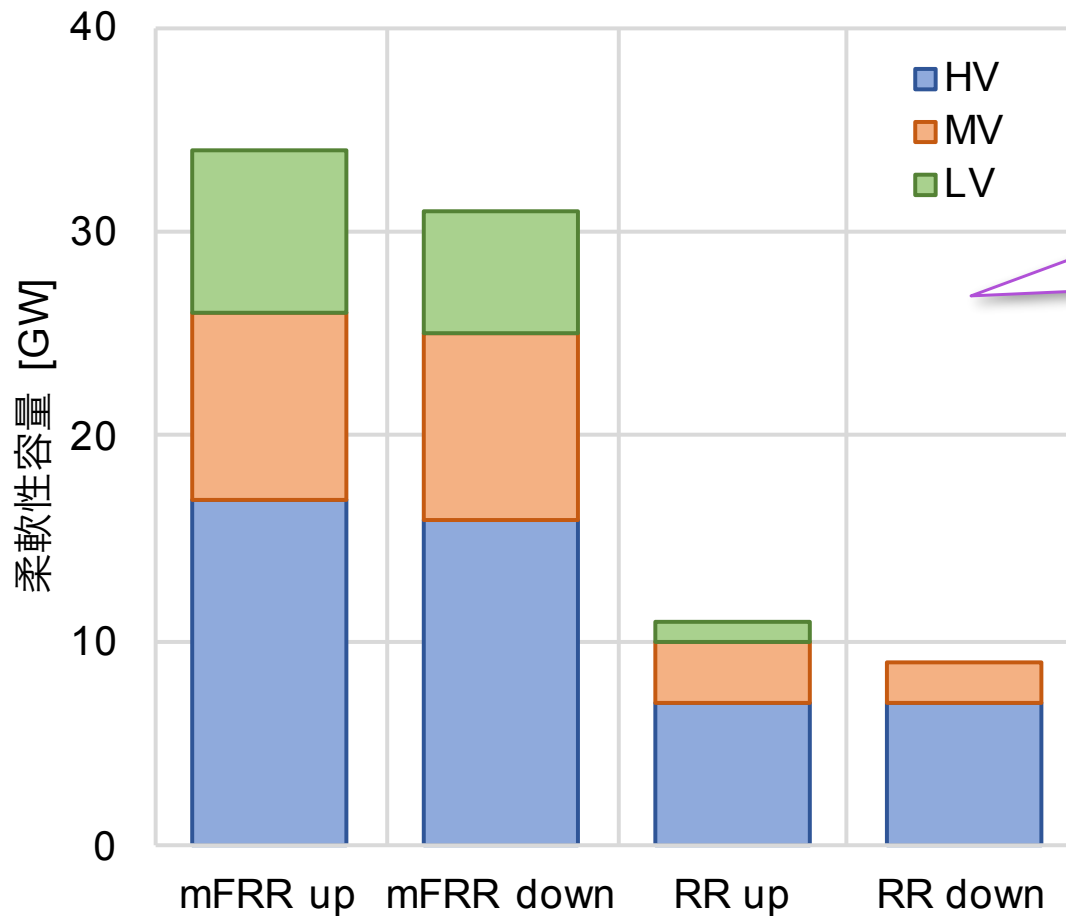


柔軟性供給の優先順位





欧州系統に接続された柔軟性容量

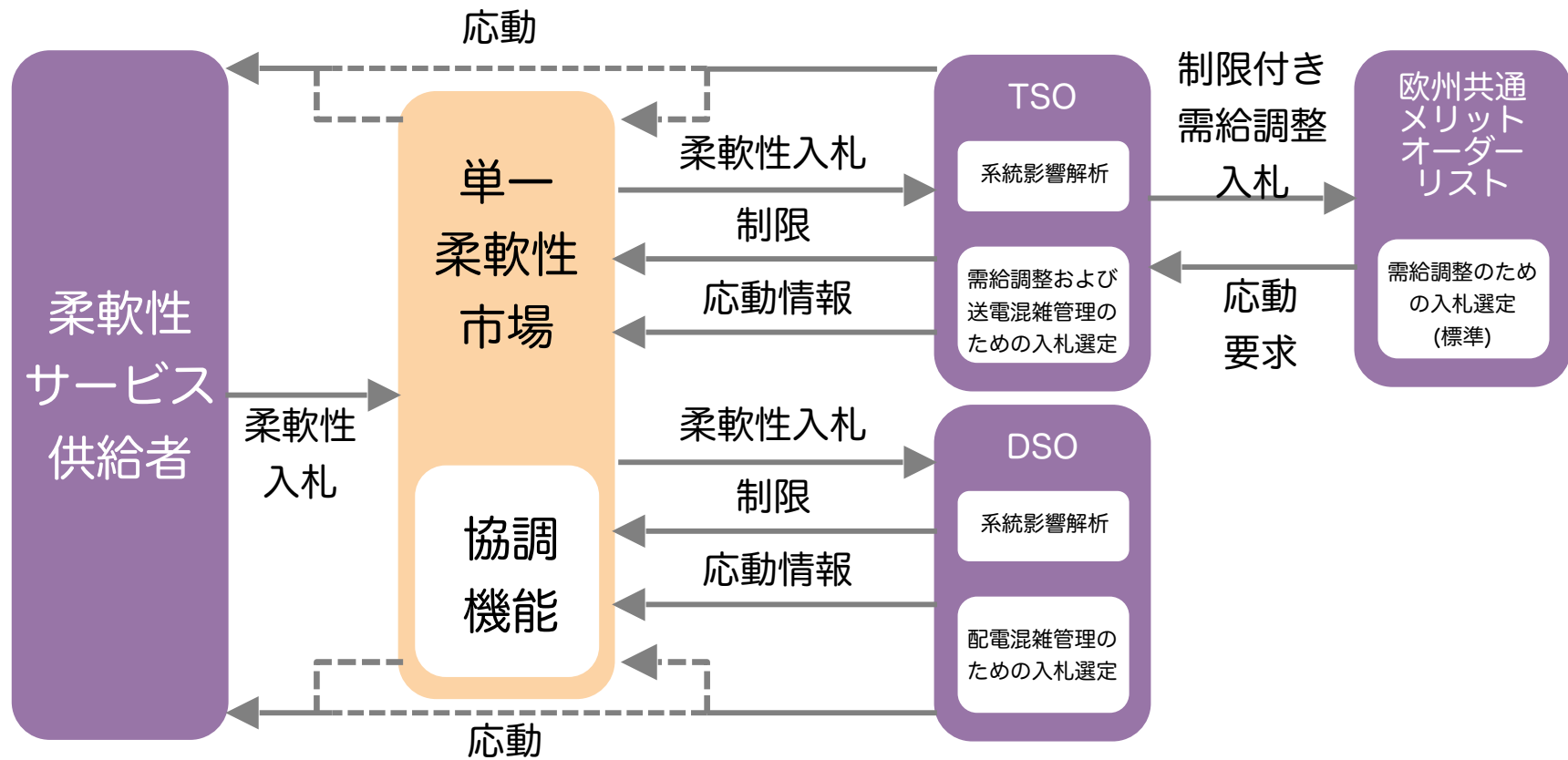


配電線レベルに接続される分散型電源は貴重な柔軟性供給源

- HV: high voltage (高压)
- MV: medium voltage (中压)
- LV: low voltage (低压)
- mFRR: manual Frequency Restriction Reserve (手动周波数制限予備力)
- RR: Replacement Reserve (置换予備力)
- up: 上方予備力
- down: 下方予備力



ENTSO-Eによる 柔軟性市場の概念図



(出典) ENTSO-E: Distributed Flexibility and the value of TSO/DSO cooperation
– A working paper for fostering active customer participation (2017)

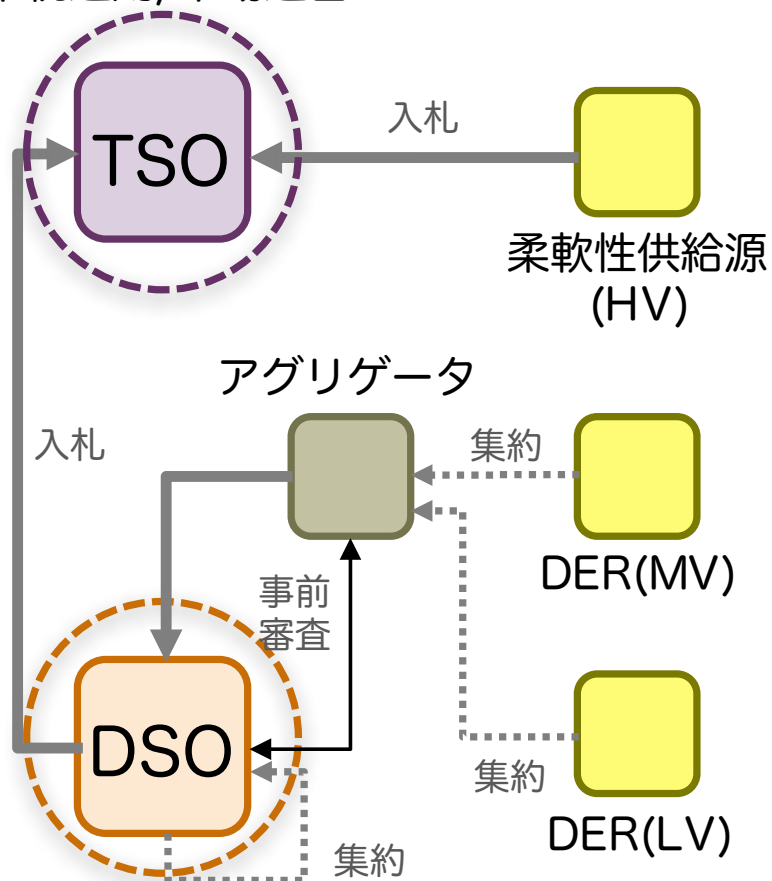
+ ローカル/統合型柔軟性市場モデル



(a) ローカル柔軟性市場モデル

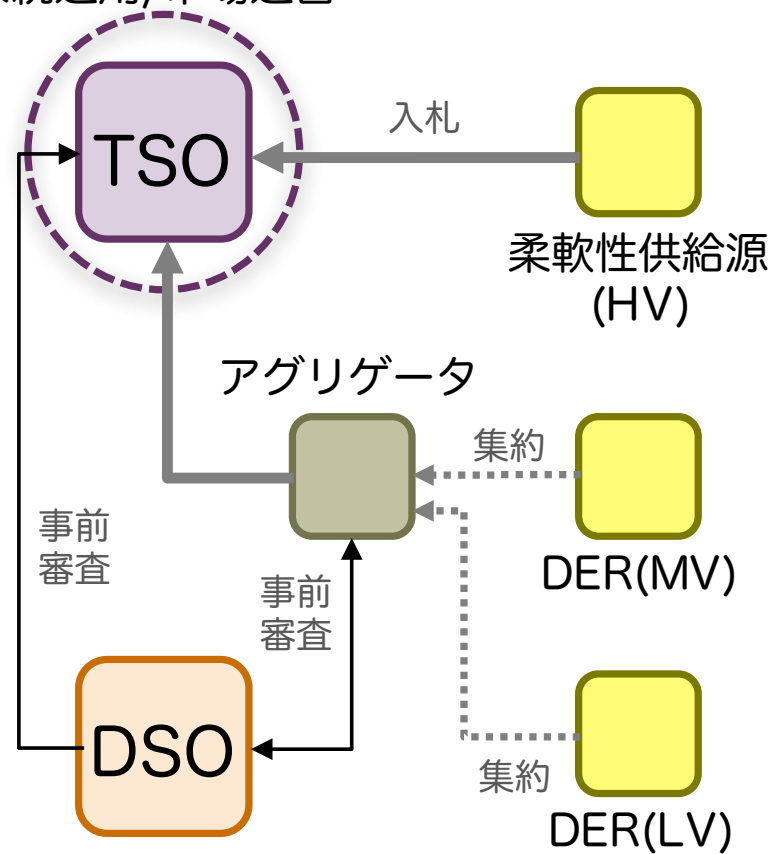
(b) 統合柔軟性市場モデル

系統運用/市場運営



系統運用/市場運営

系統運用/市場運営

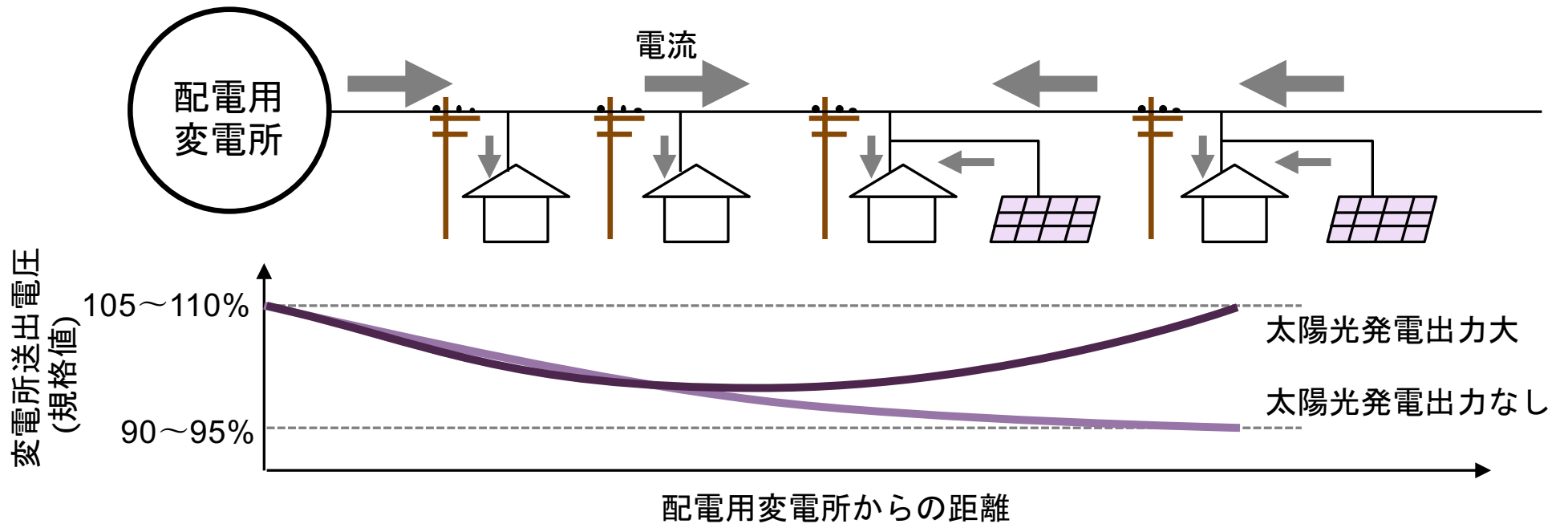




電圧上昇問題

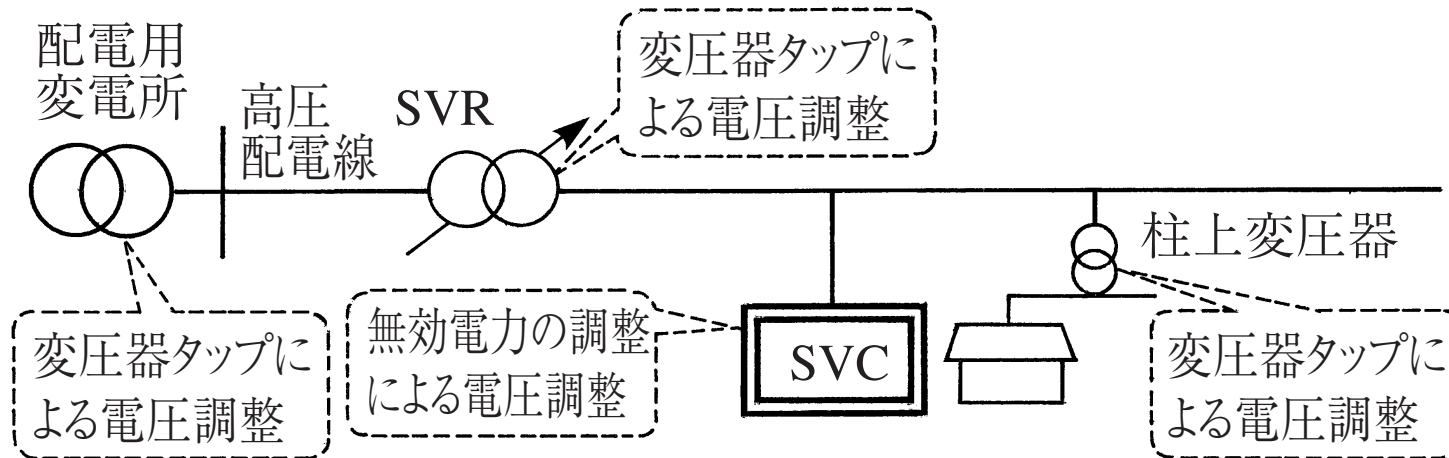


- 配電線の「下流」から太陽光発電の逆潮流があると電圧制御困難になる恐れ



電圧上昇問題

- 電圧制御は既に技術的に確立されている。
 - 既存技術: OLTC, SVR, SVC, etc...
 - 風力: 多くの風車が既に電圧制御機能を搭載済



(出典) 小澤知弘: 配電線における電圧変動, 電気設備学会論文誌, Vol.25, No.10, pp.781-783 (2005)

- 課題: 規制(法令)、コスト割当の問題



+ エネルギーに関する意思決定

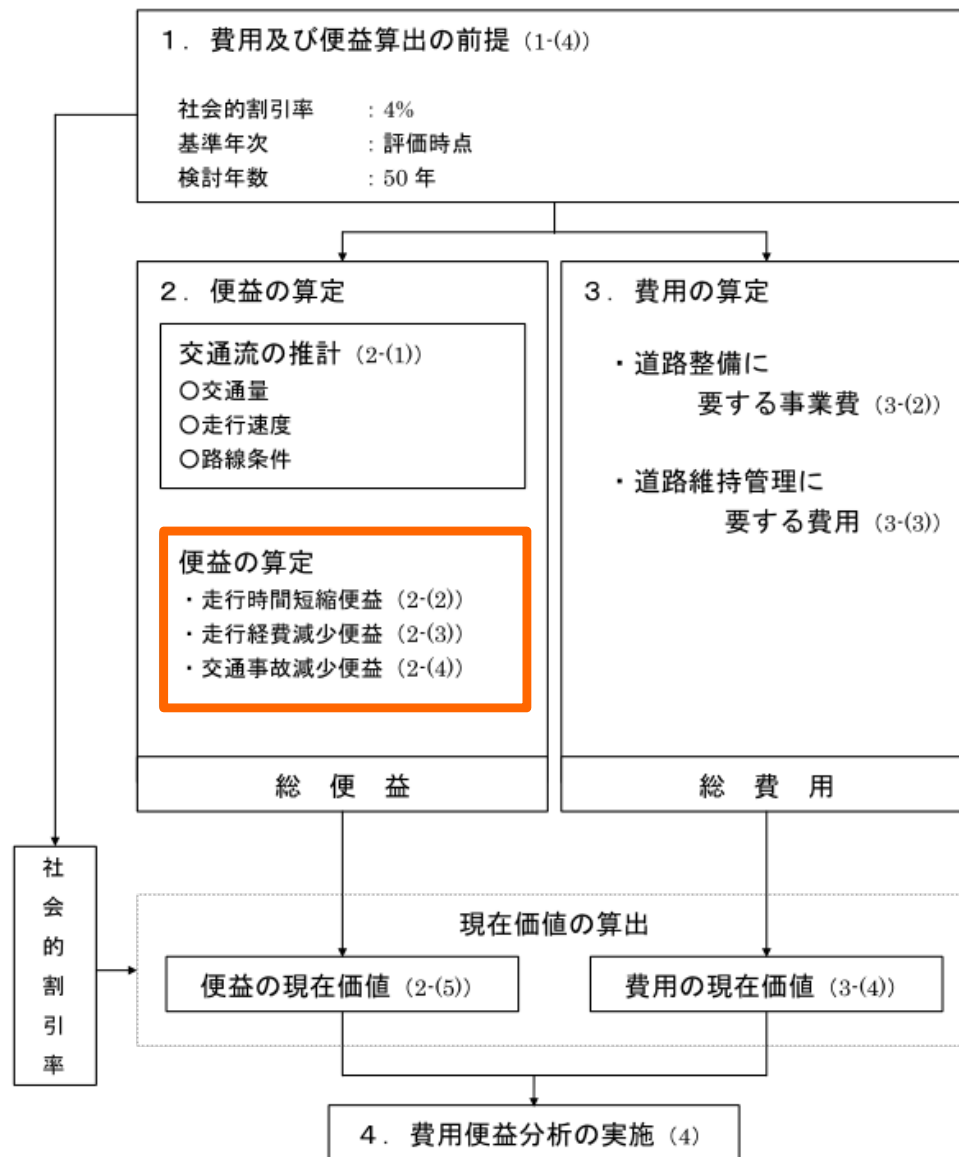
- **費用便益分析 (CBA) の必要性**
 - 費用 (コスト) > **便益** (ベネフィット)
 - 推進すべきではない。
 - コスト削減を努力する。
 - 費用 (コスト) < **便益** (ベネフィット)
 - コストが高くても推進すべき。
 - コストを支払う世代と便益を受け取る世代が異なる場合、どう合意形成を図るか…？
(例: 公害問題、地球温暖化)
- 費用便益の**定量化**が必要
- 費用には隠れたコスト(**外部コスト**)も考慮する。



費用便益分析 (CBA)



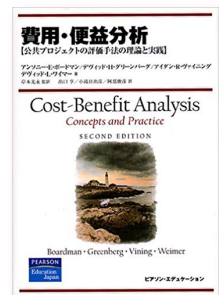
- 土木・公共事業
 - 日本でも普及
- 電力事業
 - 欧米では定量分析の報告書も多い
 - 日本でも徐々に..



費用便益分析

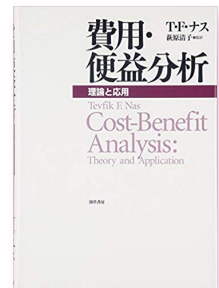


- CBA(費用・便益分析)の広義の目的は、**社会的意思決定を支援**することである。
- **市場の失敗**があると、政府介入の一応の理論的根拠になる。(中略) 選択肢に関しては、現状も含むが、ある特別な介入がより優れて効率的であることを実際に提示できなければならない。この目的のためにCBAを行うのである。



(出典) A.E.ボードマン他:「費用・便益分析 - 公共プロジェクトの評価手法の理論と実践」, ピアソン (2004) p.5

- 費用便益分析の目的は、政策の実施についての**社会的な意思決定を支援**し、社会に賦存する**資源の効率的な配分を促進**することである。



(出典) T.F.ナス:「費用便益分析 - 理論と応用」, 勁草書房 (2007) p.217 監訳者あとがき



- 規制影響分析 **RIA: Regulatory Impact Analysis**
 - 規制政策の最適選択のための定量分析
 - **費用便益分析 CBA: Cost Benefit Analysis** が中心的技法
- 米国
 - 1981年大統領令12991号
Executive Order 12291 – Federal regulation
 - 1992年連邦行政予算管理局通達 OMB A-94号
OMB Circular A-94: Guidelines for Benefit-Cost Analysis
- 日本
 - 2014年閣議決定「規制改革・民間開放推進3か年計画」
 - 経済産業省 規制の事前評価・事後評価
https://www.meti.go.jp/policy/policy_management/RIA/



- 1. 分散型電源とはなにか？ (用語の定義)
 - 送電/配電
 - 高圧/低圧
 - 分散型電源

- 2. 分散型電源 (=再生可能エネルギー) の課題
 - 需給調整は誰が行うか？
 - 電圧調整は誰が行うか？
 - 費用便益分析は誰が行うか？

- 3. まとめ



+ グッドな地産地消と バッドな地産地消

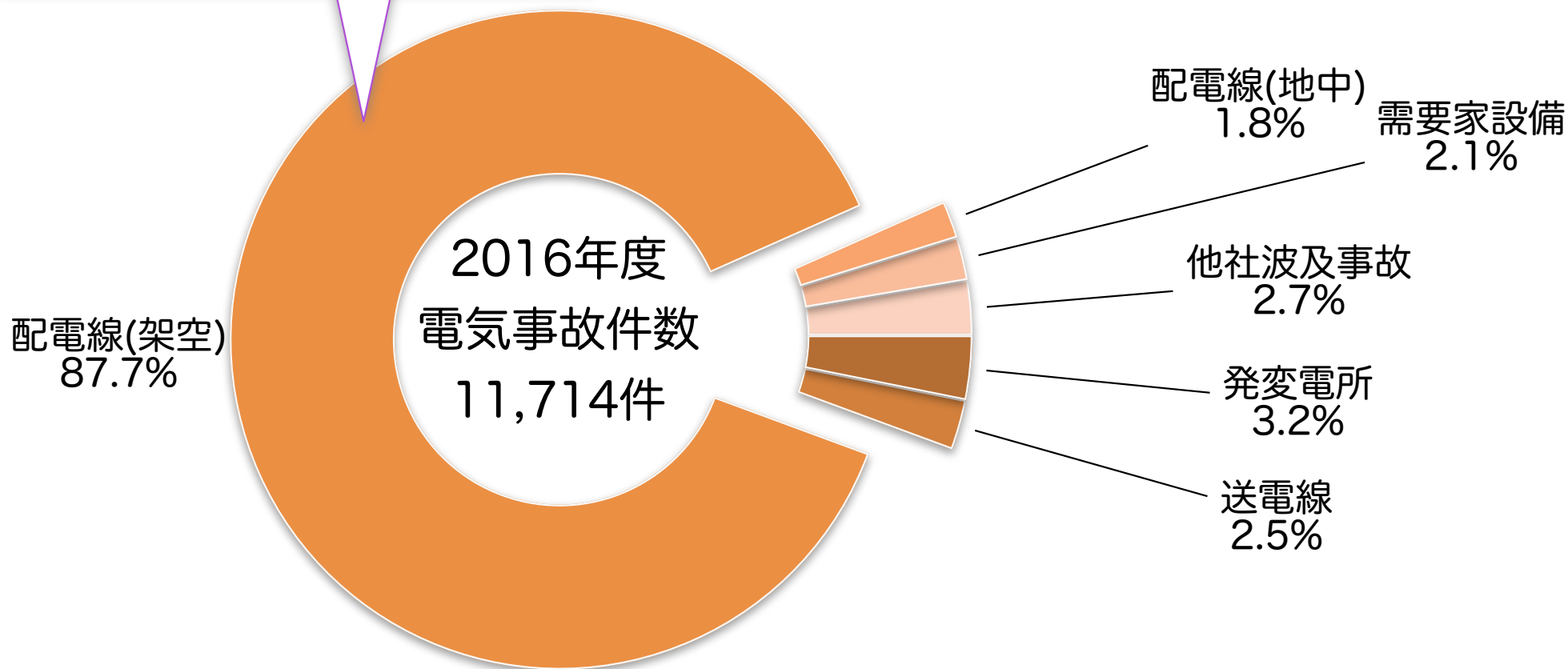
- **バッド**な地産地消 (オフグリッド指向)
 - 栄光ある独立、自前主義、電力会社不信
 - ☞ 鎖国主義、流通・取引の否定・軽視
 - 費用便益分析の不在 ☞ 過剰備蓄 (安易な蓄電池の導入)
 - 供給信頼度の低下の可能性も
- **グッド**な地産地消
 - 常時は広域送電網と接続・市場取引
 - 緊急時のみ一時的に独立
 - 再エネ輸出超過 ☞ 外資獲得
 - 地域のオーナーシップ, 外部との技術提携



日本の電気事故件数



配電線での電気事故が最も多い。
☞ 維持管理に多額の人件費と
高度な技術教育が必要



(データソース) 経済産業省：平成28年度電気保安統計 (2017)

http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/28hoan-tokei.pdf

+ ZEH (ネットゼロエネルギーハウス)

37

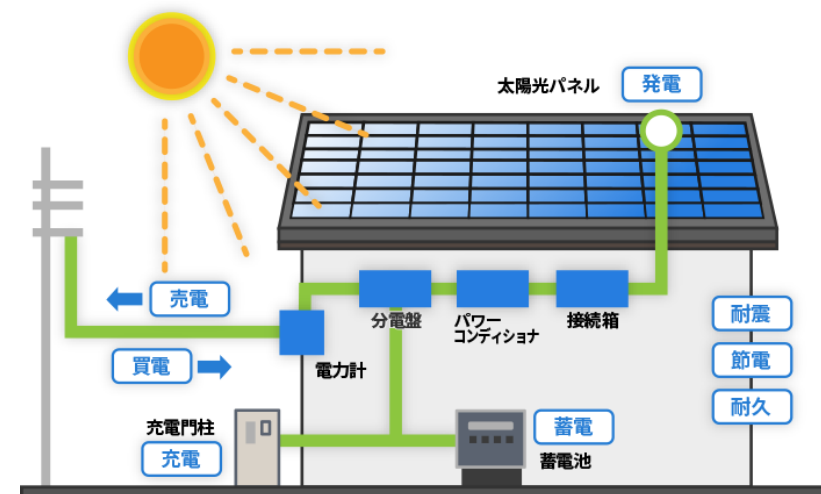


- ZEHはオフグリッド(鎖国)ではない！
 - 常時は電力系統と接続して電力のやり取り
 - ネットゼロという発想

$$\text{消費エネルギー} - (\text{OFF} + \text{創エネ}) = 0$$

以下
一年間の消費エネルギー

- 地域分散型エネルギーも本来同じ
 - エネルギー/柔軟性の輸出
 - 他地域との広域連携(アグリゲーション)
 - 市場取引



まとめ



- 分散型電源とは？
 - 【暫定定義】 概ね140 kV未満の電圧階級の線路
(日本では66~77 kV級以下の電圧階級の線路)
に接続される電源に接続される電源
- 分散型電源の課題
 - 需給調整は誰が行うか？ 👉 アグリゲーター(BRP)
 - 平時は広域送配電網と接続、他地域との協調
 - 電力市場取引を通じて需給調整に参加
 - 電圧制御は誰が行うか？
 - 👉 アグリゲーター(BRP)？ or DSO？
 - 多数の分散型電源との双方向通信
 - 費用便益分析は誰が行うか？ 👉 地方自治体
 - 国全体、地球全体との協調が必要



本日の参考文献



- 安田陽: 地域分散型エネルギーと系統運用問題, 大島堅一編著 『炭素排出ゼロ時代の地域分散型エネルギーシステム』, 第2章, 日本評論社 (2021)
- 安田陽: 地域分散型エネルギーと電力市場, 大島堅一編著 『炭素排出ゼロ時代の地域分散型エネルギーシステム』, 第10章, 日本評論社 (2021)
- 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ~電力市場編, インプレスR&D (2020)
- 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ~系統連系編, インプレスR&D (2019)
- 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)

2021年
5月末
発刊予定





JPEA-京都大学
共催シンポジウム

分散型電源と配電網

～地域から考える再エネ大量導入と脱炭素～

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

