



京大再エネ講座
特別講義

2020年12月21日

人文社会系研究者のための電力工学入門

～再生可能エネルギーの系統連系問題を
理解するための基礎知識～



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

+ 本講義の目的



- 再生可能エネルギー/電力システムの研究をしたい！



- 電力は難しい…(?) _|_|○
 - 専門用語が多過ぎ…。
 - 基礎理論(特に数式!)はどれくらい必要?
 - 海外情報はどこで/どうやって取ればよい?
 - 専門研究者/企業からケムに巻かれないようにするには…?



+ 再エネ超大量導入は可能か？ (再エネは電力系統に悪影響を与えるか？)

- 単純な「Yes/No」に陥らないこと。
 - 賛成/反対の極端な二元論的対立(神学論争)になりやすい。
 - 再エネ賛成派は、課題を過小評価しないこと。
 - 再エネ慎重派は、将来の課題を理由に思考停止しないこと。
- 「どの程度？」
 - 程度問題。解決策は？ 代替案は？ 実現可能性は？
- 「いつまでに？」
 - 時間軸の問題。技術開発ロードマップ、優先順位
- 課題：
 - ① 需給調整 ■ ② 電圧上昇問題 ■ ③ 慣性問題



電力工学を勉強するためには (電気工学科のカリキュラム例)

年次	科目例	学習内容
高校	数学I~III, 数学A~C	三角関数, 指数関数, 対数関数, 微分積分, 行列, ベクトル, 複素数
大学1年次	微積分学, 線形代数, 電気回路	微分方程式, 積分方程式 ベクトル, 複素ベクトル 電気回路, 電力回路, 三相交流
2年次	電気電子数学, 電磁気学, 数理統計	ラプラス変換, フーリエ変換, 電磁気学, 伝送工学
3年次	電気機器, パワー エレクトロニクス, 電力システム工学, 放電工学, 電気材料	半導体工学, エネルギー変換, 電力発生, 電力輸送, 高電圧
4年次	電気法規	安全工学, 信頼性工学

+ ご自身の専門外の分野を学ぶには？

■ 専門用語を抑えよう

- 用語の定義
- 国際最新議論での注目用語

数式はあると便利だが
なくとも理解可能

■ 国際動向を抑えよう

- IEA, IRENAの動向
- 日本語になっていること、なっていないこと

理工系では調査研究
の地位は低い

■ 時間軸を抑えよう

- 常識を疑え。その常識は「古い」かもしれない。
- 文献調査の重要性

+ 目次



- 1. 電力系統とはなにか？ (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
 - ① 需給調整
 - ② 電圧上昇問題
 - ③ 慣性問題

+ 電力系統とは？



■ 電力系統 [electric power system]

- 発電所から消費者の受電設備に至る電気のネットワークの総称。火力発電所、水力発電所、原子力発電所などの**発電設備**で発電された電気は、18.7万V（中略）以上の高い電圧の送電ネットワーク（これを「**基幹系統**」と言う）によって送電され、より低い電圧の送電ネットワーク（これを「**地域供給系統**」や「**二次系統**」と言う）・配電ネットワーク（これを「**配電系統**と言う」）を経て、需要者の**変電設備**へと届けられる。（後略）

「電力システム」の定義は(今のところ)見当たらない。
「電力系統」と「電力システム」はどう違うか？

+ 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、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 高压	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	高压	配電 線
200 V				低压	
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											

(出所) 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
 - 法令や学会で定義されていない!
 - 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
 - (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)

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。

+ 目次



■ 1. 電力系統とはなにか？ (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

- ① 需給調整
- ② 電圧上昇問題
- ③ 慣性問題



直線運動の
運動方程式
と同じ形

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

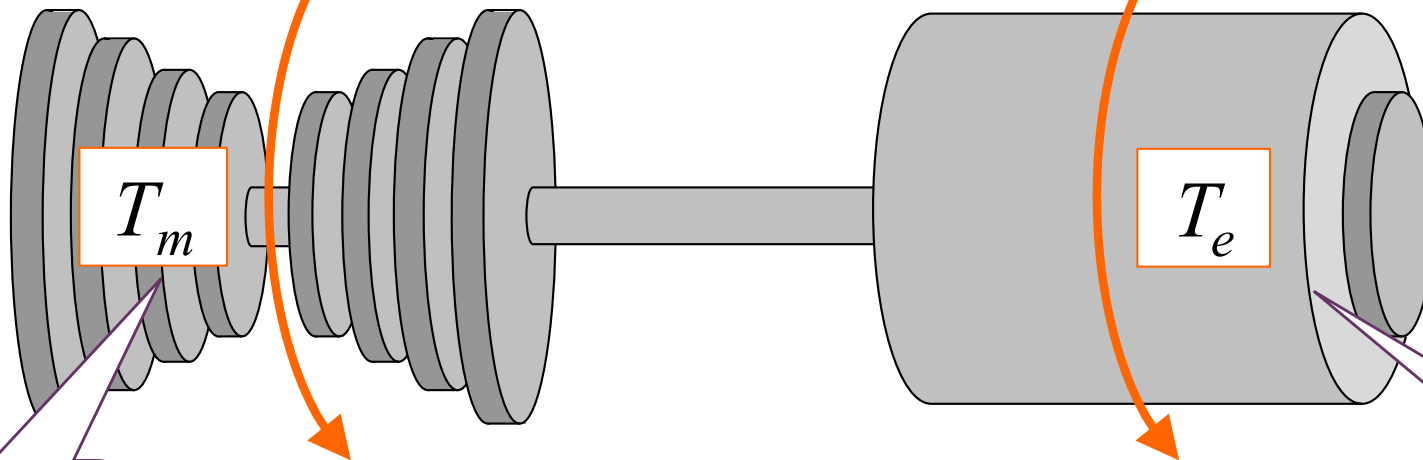
+ タービン発電機の基本方程式

慣性モーメント

$$J \frac{d\omega}{dt} = T$$

角周波数

トルク



機械的
トルク

タービン

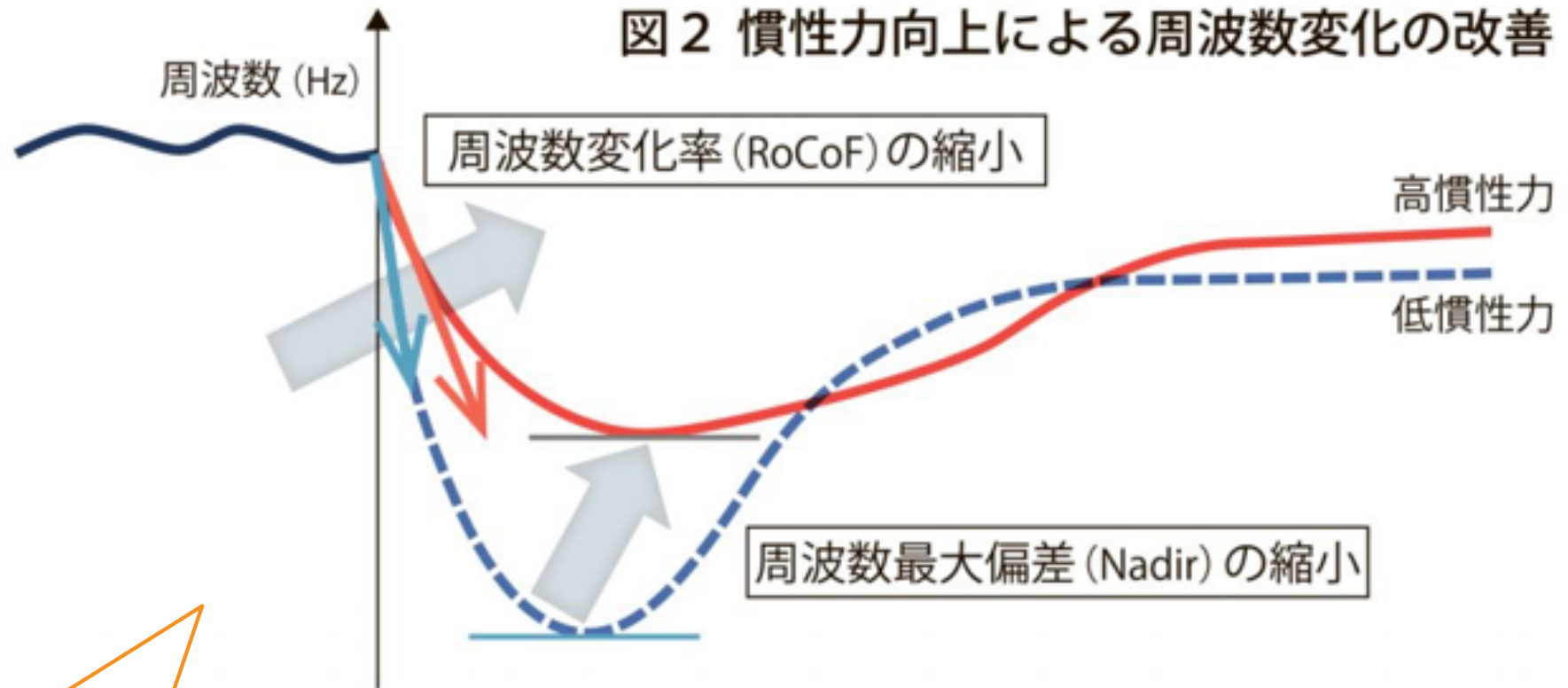
発電機

電氣的
トルク

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e$$

+ 事故時の周波数変化

図2 慣性力向上による周波数変化の改善



安全限界を越える
と発電機解列

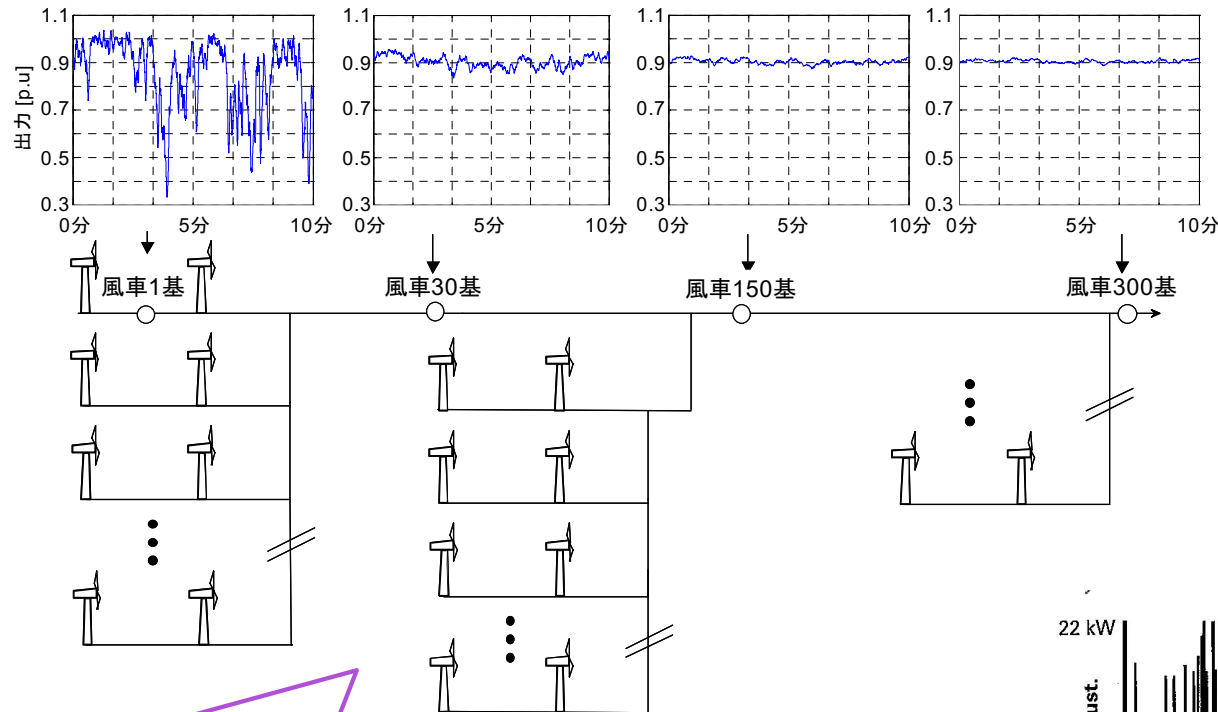
需給バランス
がさらに悪化

連鎖停電
系統崩壊

(出典) 石井英雄: 慣性機能をどう確保するか。これが再エネ導入拡大のポイントだ, グリッド・デモクラシーへの鍵 第3回 再エネと安定性, 電気新聞 テクノロジー&トレンド, 2020年3月13日

<https://www.denkishimbun.com/sp/50923>

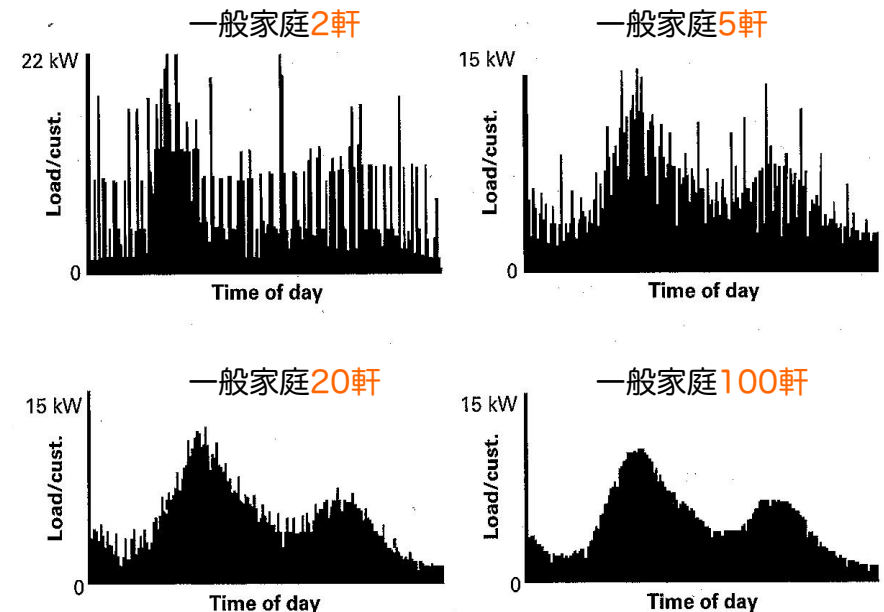
+ 集合化(または平滑化)のコンセプト



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、電力システム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



+ 予備力の種類

■ 瞬動予備力 **spinning reserve**

- ✓ 運転予備力のうち，電源脱落時に即座に出力増加が図れる予備力。【主に水力・運転中のガス火力】

■ 運転予備力 **operating reserve**

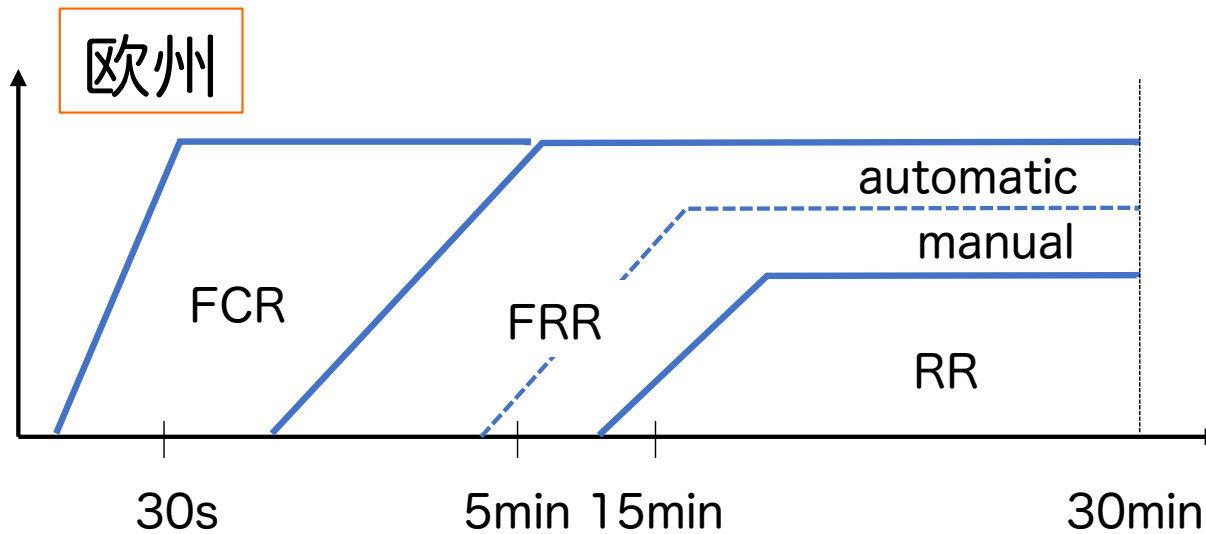
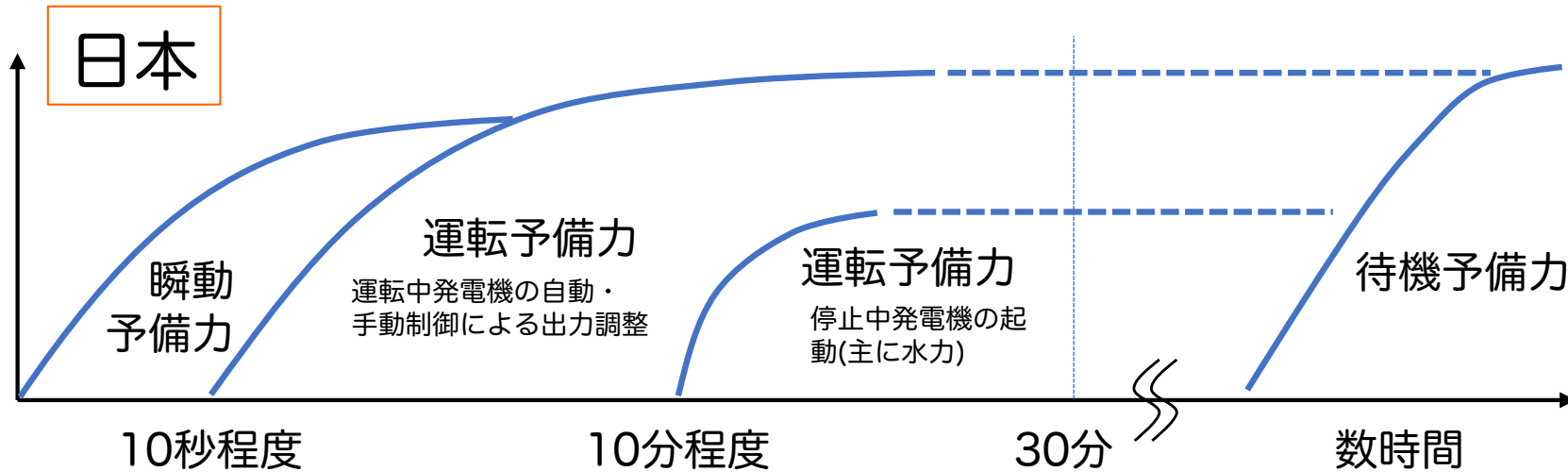
- ✓ 供給予備力のうち，数分で供給力増加が可能な予備力。【主に停止中のガス火力、運転中の石炭火力】

■ 待機予備力 **standing reserve**

- ✓ 供給予備力のうち，起動して発電するまでに数時間を要し，起動後は長時間継続して発電が可能な予備力。【主に停止中の石炭火力】



+ 予備力(reserve)の種類



FCR: Frequency Containment Reserve

FRR: Frequency Restriction Reserve

RR: Replacement Reserve:

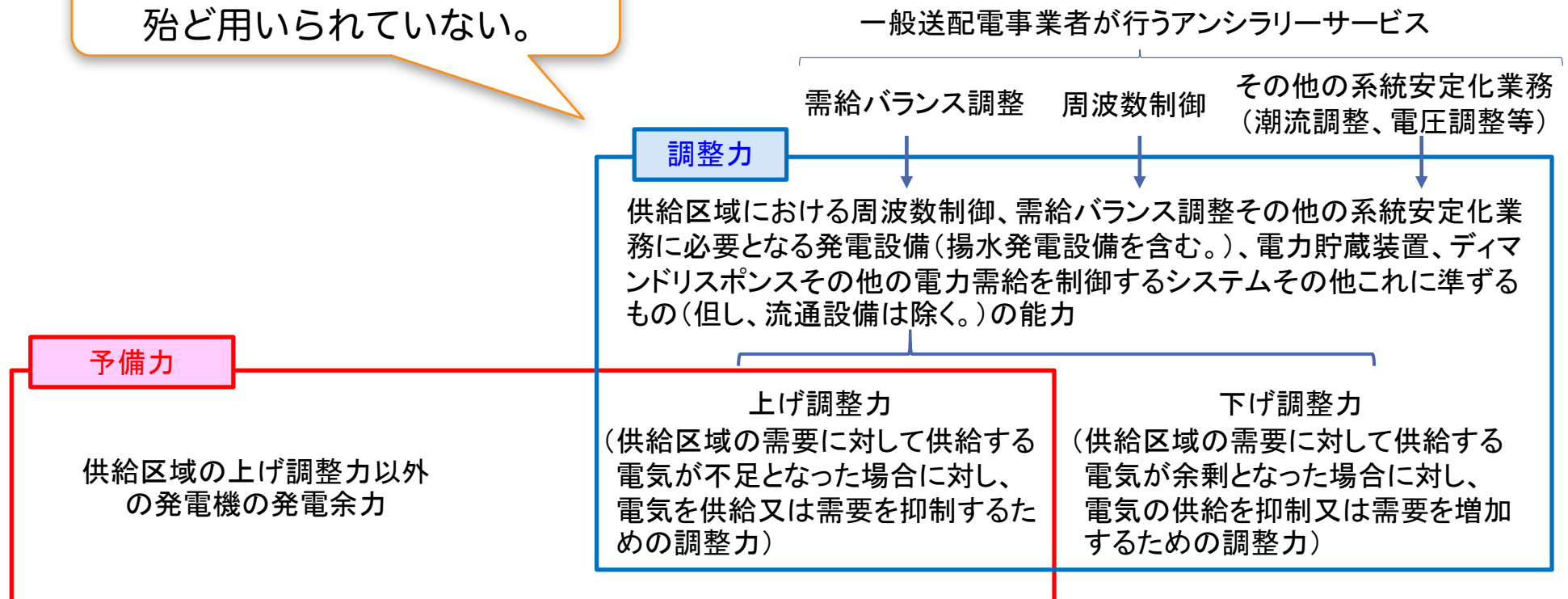
従来は一次予備力、二次予備力、三次予備力などと呼ばれていた。

(出典) 電力広域的運営推進機関 調整力等に関する委員会: 中間とりまとめ (2016), 付属資料S-1 の図を抽出して筆者改変

ENTSO-E: Explanatory document concerning proposal from all TSOs of the Nordic synchronous area for the determination of LFC blocks within the Nordic Synchronous Area (2018), p.6 の図を抽出して筆者改変

+ 広域機関による調整力・予備力の定義

調整力に相当する英語は現在殆ど用いられていない。



国際的に多く用いられている予備力の定義が後退

国際的に議論が盛んな柔軟性が定義されていない



+ 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)

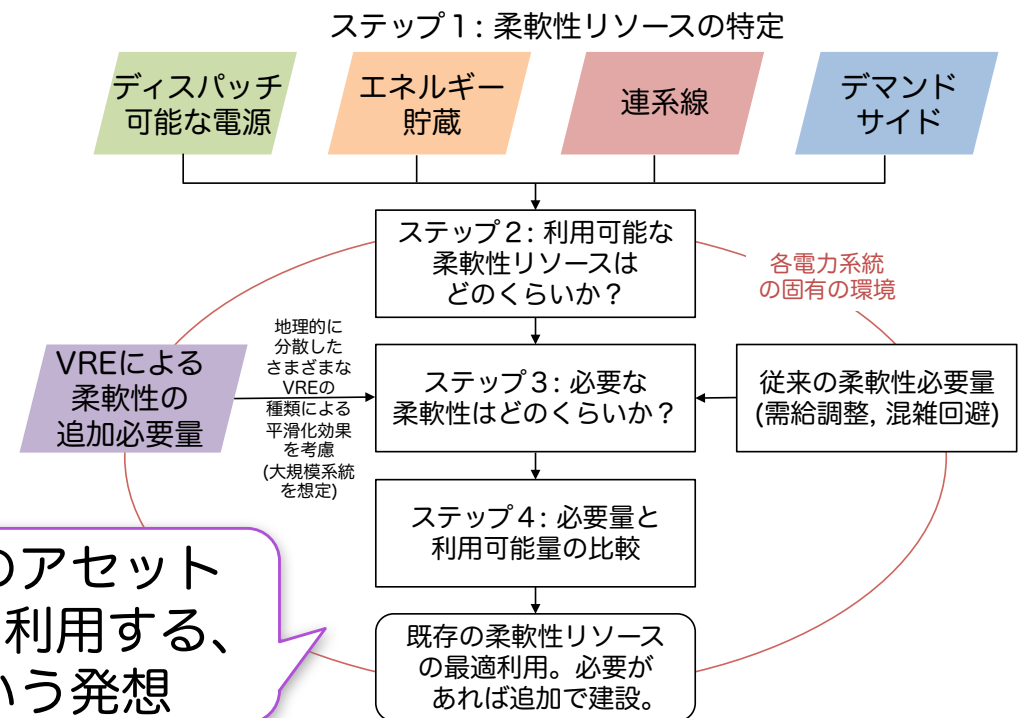
■ エネルギー貯蔵装置

- 揚水発電
- 蓄電池

■ 連系線

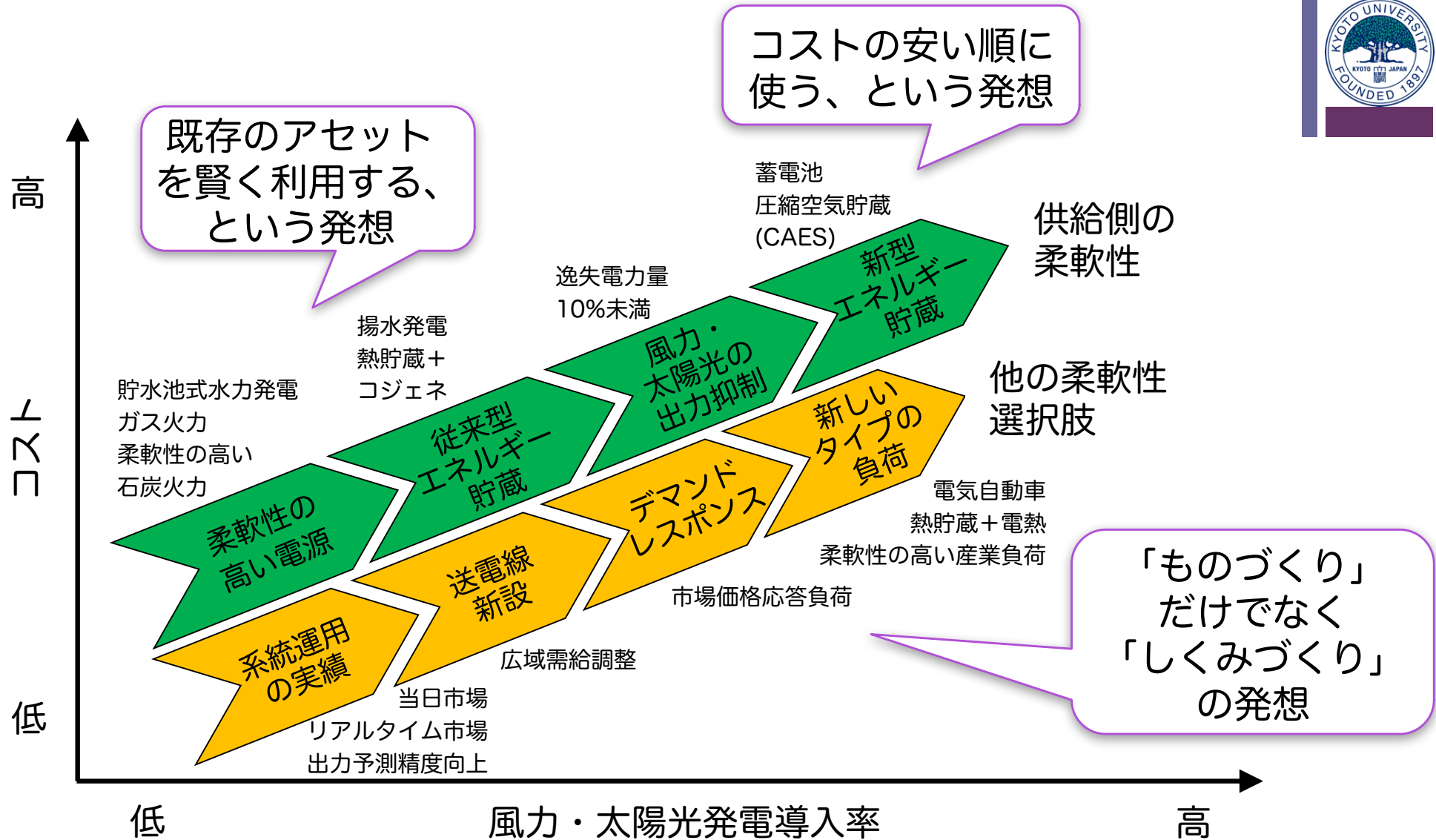
■ デマンドレスポンス

- 電気自動車





+ 柔軟性の優先順位





+ 需給調整責任は誰が担うか？

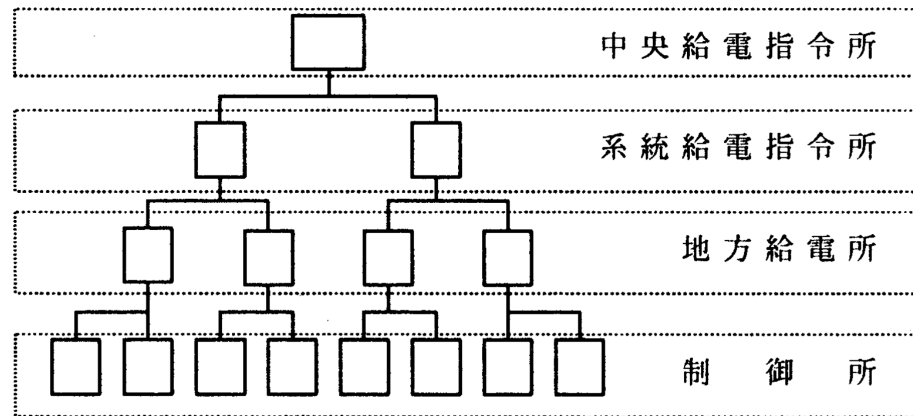
- 古典的考え方 (日本では現在も)
 - 垂直統合された電力会社の中央給電指令所
 - 系統内のすべての発電所を集中監視・制御

エネルギーの民主化！
…だけでなく、
需給調整も民主化！

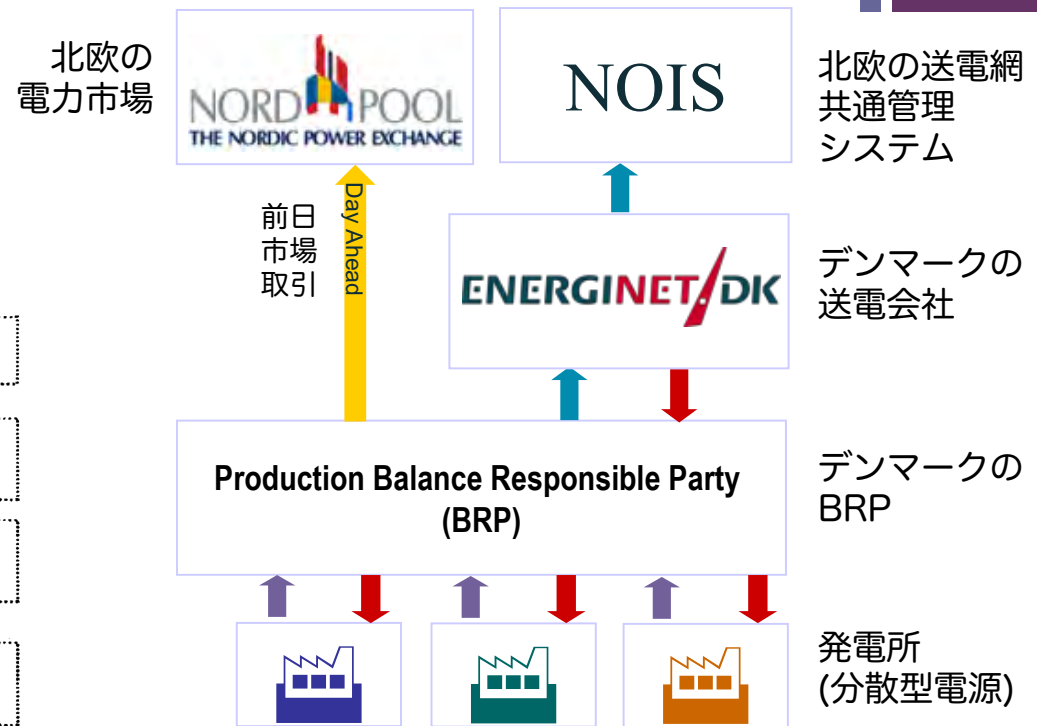
- 欧州
 - **BRP: Balance Responsible Party** がインバランスコストを最小化するように行動
 - 市場メカニズムで**複数のプレイヤー**が需給調整に参画・責任
 - 送電会社は主に監視。いざという時だけ介入。



+ 需給調整責任は誰が担うか？



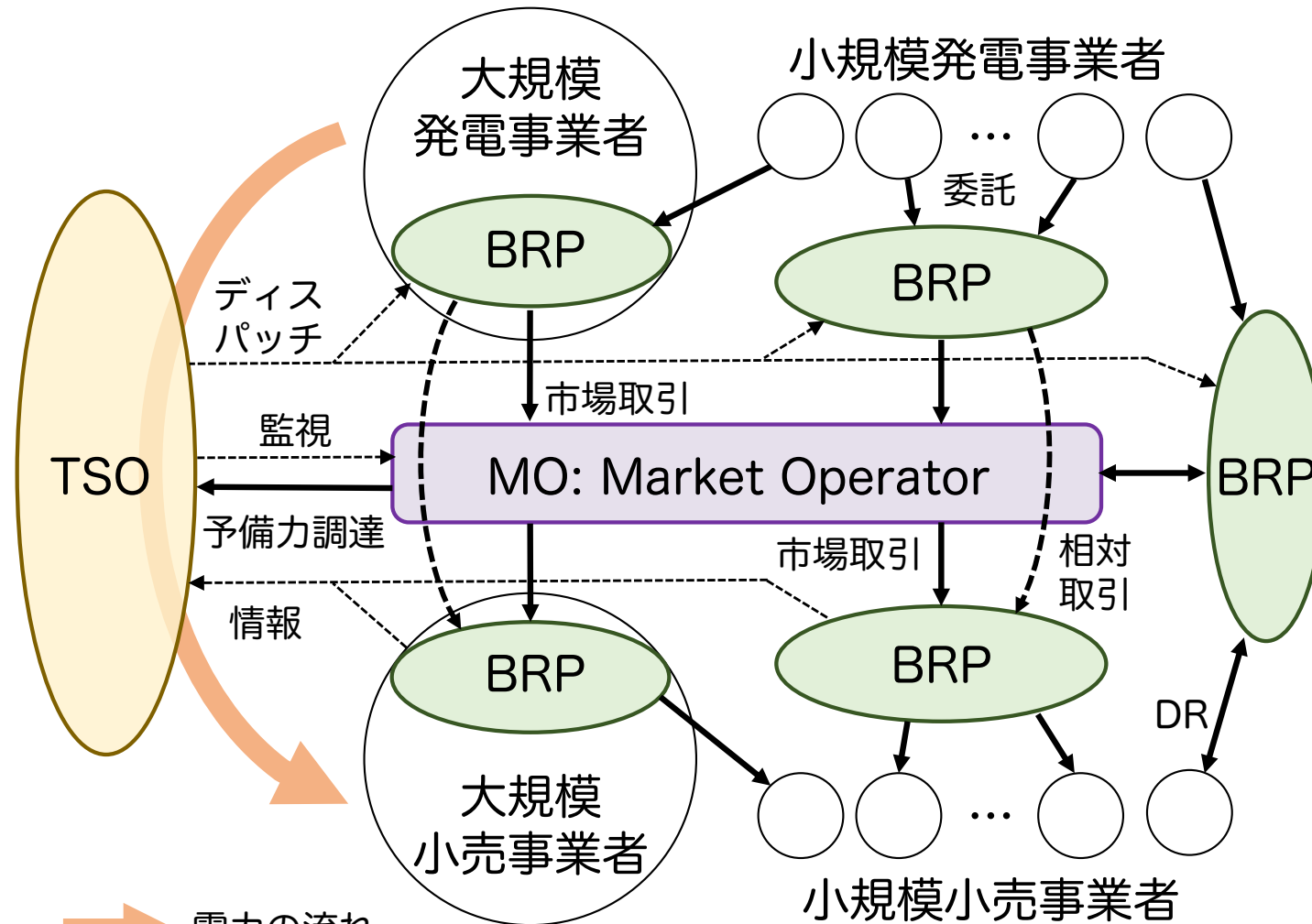
発送電分離前
(日本の例)



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



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)

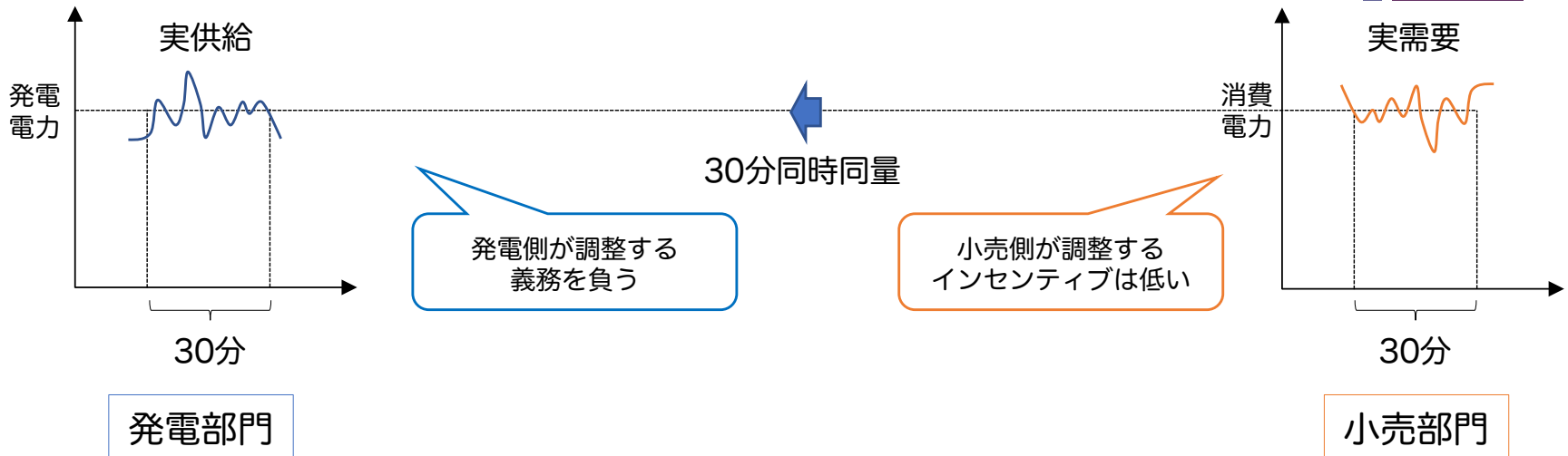
TSO: Transmission System Operator (送電系統運用事業者)

DR: Demand Response (需要応答)

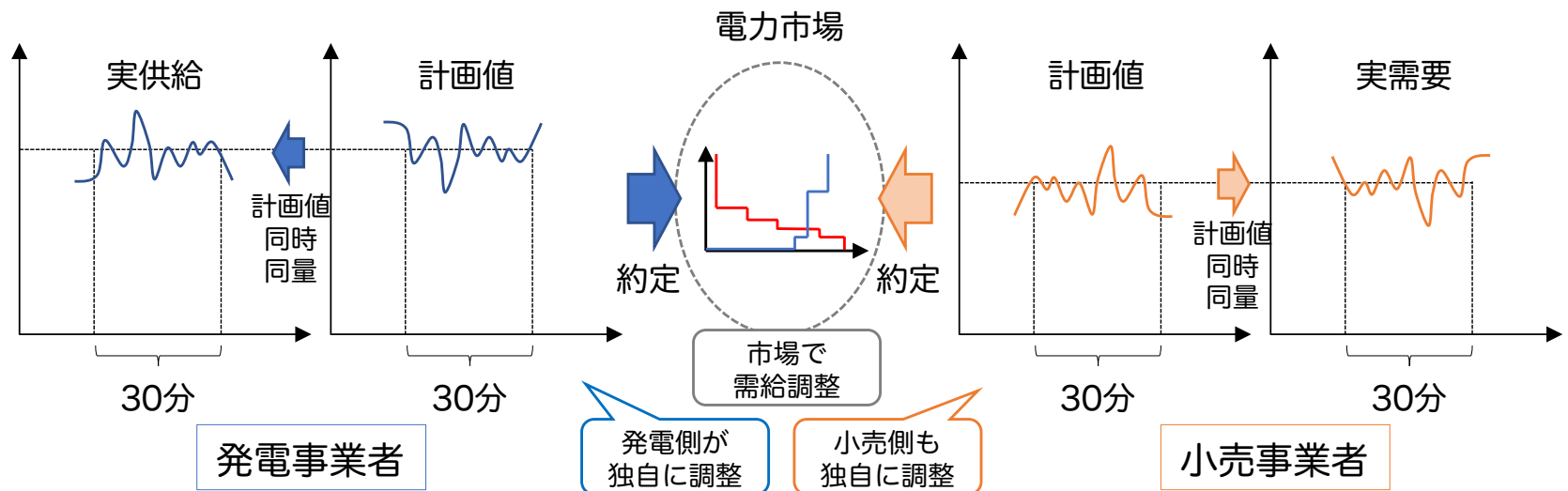


+ 30分同時同量制度と 計画値同時同量制度

(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)



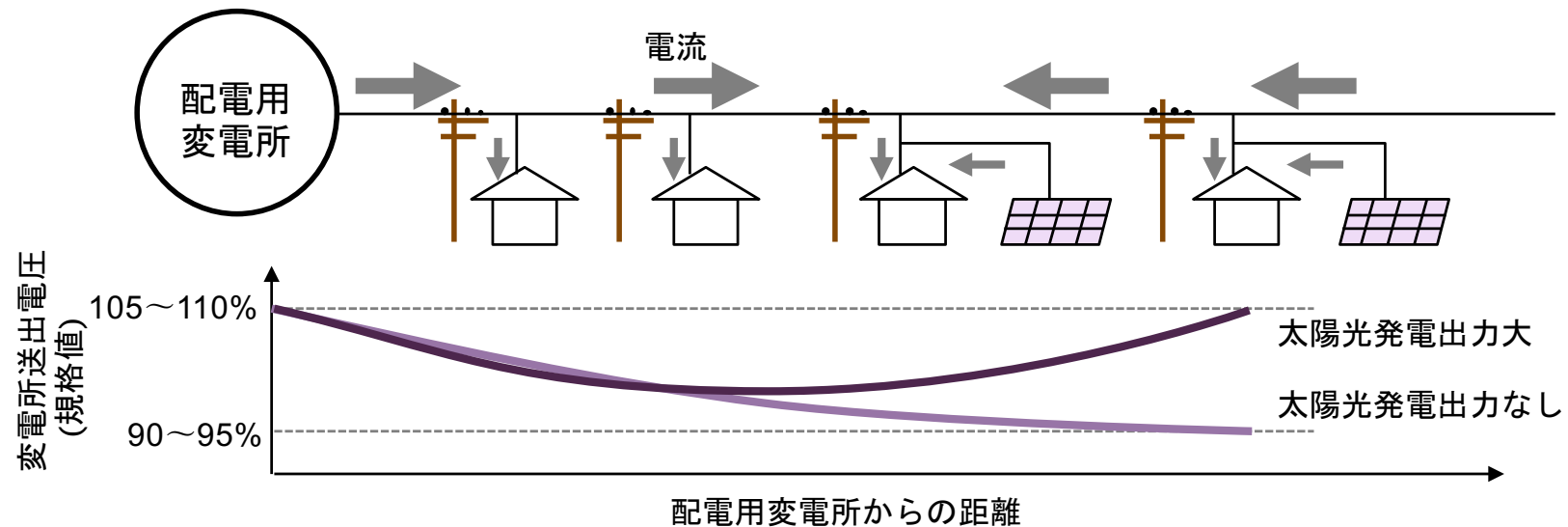
+ 目次



- 1. 電力系統とはなにか？ (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
 - ① 需給調整
 - ② 電圧上昇問題
 - ③ 慣性問題

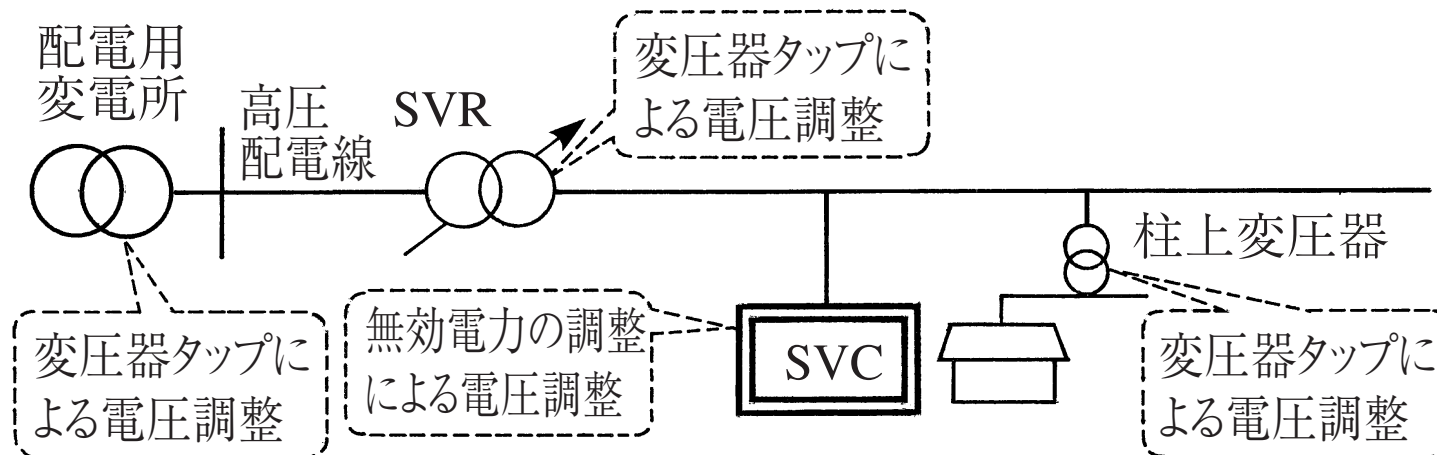
+ 電圧上昇問題

- 配電線に太陽光がたくさん入ると電圧が制御できない！



+ 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



- 課題: 規制(法令)、コスト割当の問題

+ 目次



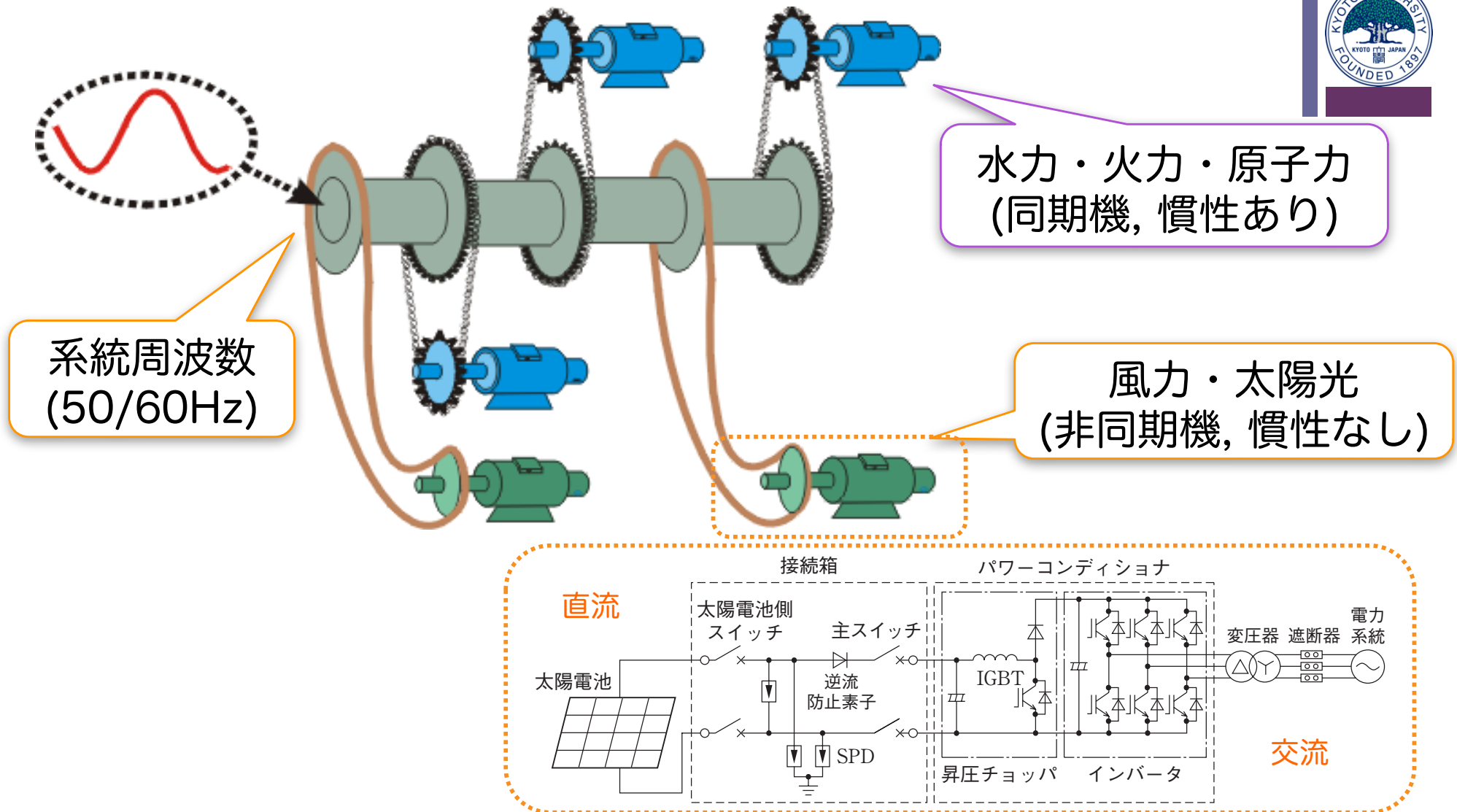
- 1. 電力系統とはなにか？ (用語の定義)
 - 送電/配電
 - 高圧/低圧
 - 分散型電源)
- 2. 分散型電源(再生可能エネルギー)の課題
 - ① 需給調整
 - ② 電圧上昇問題
 - ③ 慣性問題



+ 非同期発電機としての分散型電源

エネルギー源	発電形態	系統連系装置
自然エネルギー	太陽光発電 (直流)	インバータ
	風力発電 (交流)	回転機 (インバータ)
	小水力発電 (交流)	回転機 (小形はインバータ)
化石燃料 (ガス、石油)	燃料電池発電 (直流)	インバータ
	回転機コージェネ (交流)	回転機 (小形はインバータ)
廃棄物	ごみ処理発電 (交流)	回転機

+ 同期機と非同期機(パワエレ電源)



(出典) Mark O'Malley: Wind Integration in Ireland: a National Effort with International Consequences,
 JWEA Wind Integration Workshop (2012)

伊与田功編著: OHM大学テキスト 電力発生・輸送工学, オーム社 (2013)



直線運動の
運動方程式
と同じ形

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

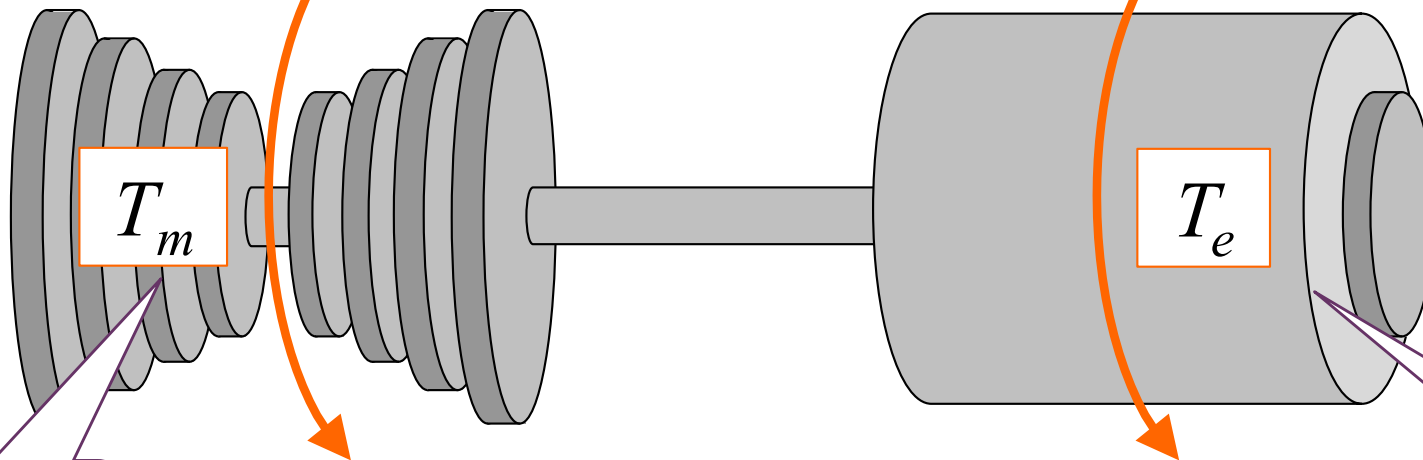
+ タービン発電機の基本方程式

慣性モーメント

$$J \frac{d\omega}{dt} = T$$

角周波数

トルク



機械的
トルク

タービン

発電機

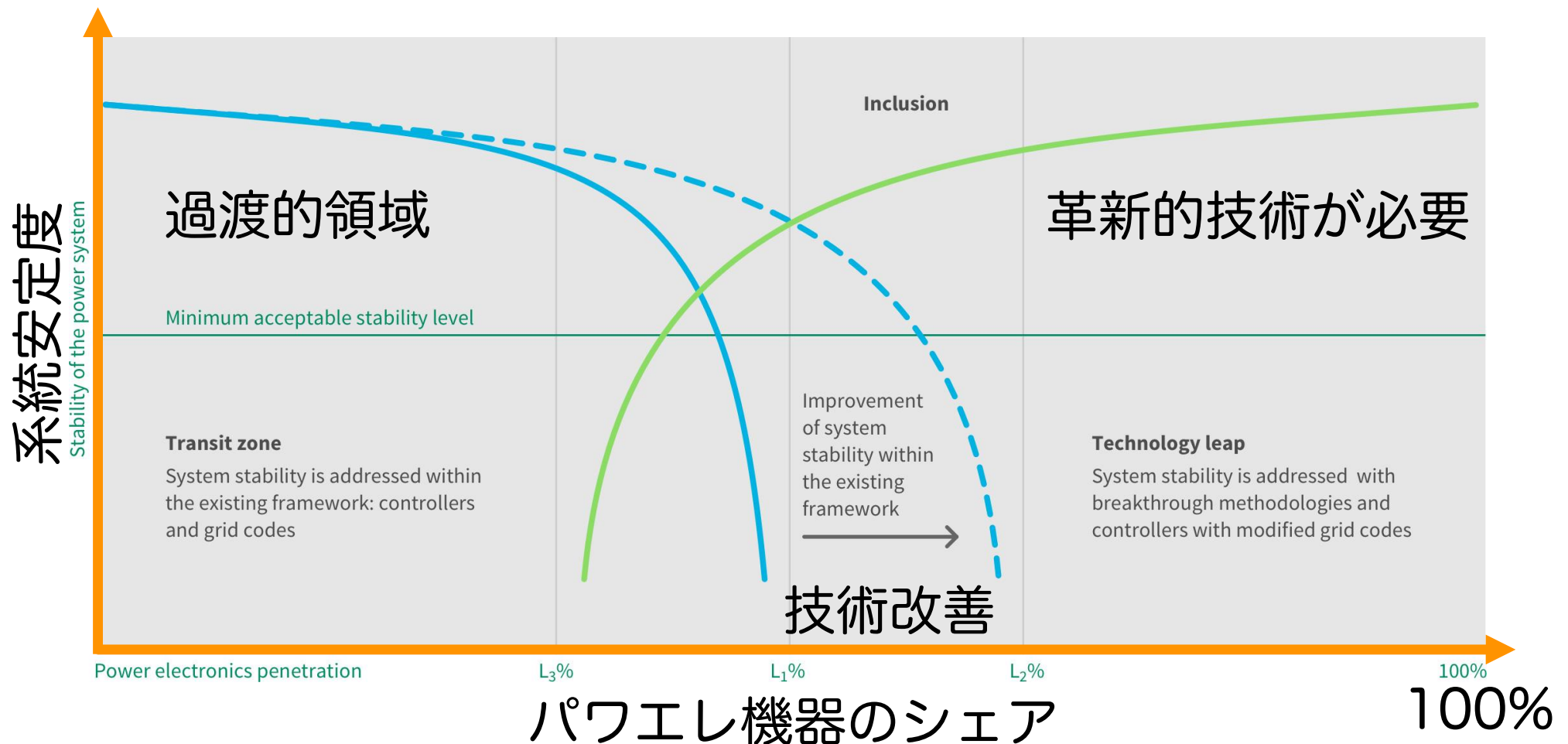
電氣的
トルク

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e$$



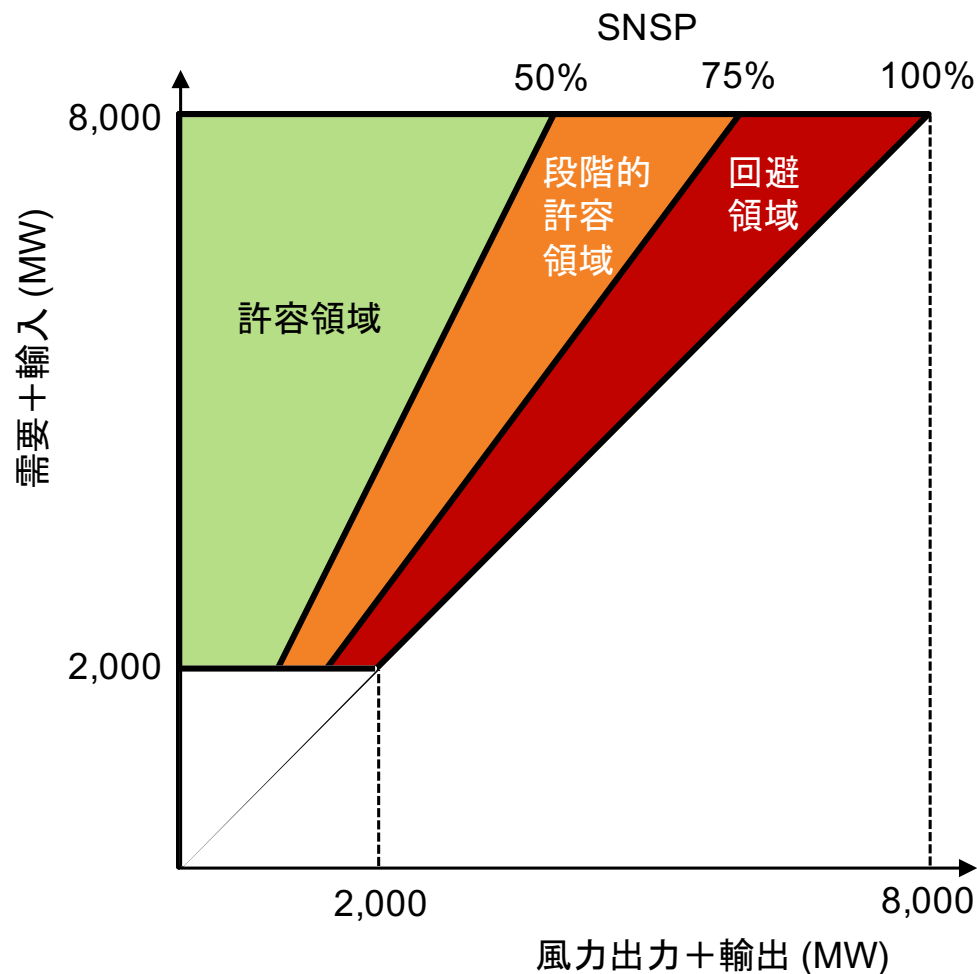
+ 課題③：慣性(不足)問題

- 分散型電源 (≡ 再生エネルギー ≡ パワエレ機器) を大量導入すると系統安定度が低下する



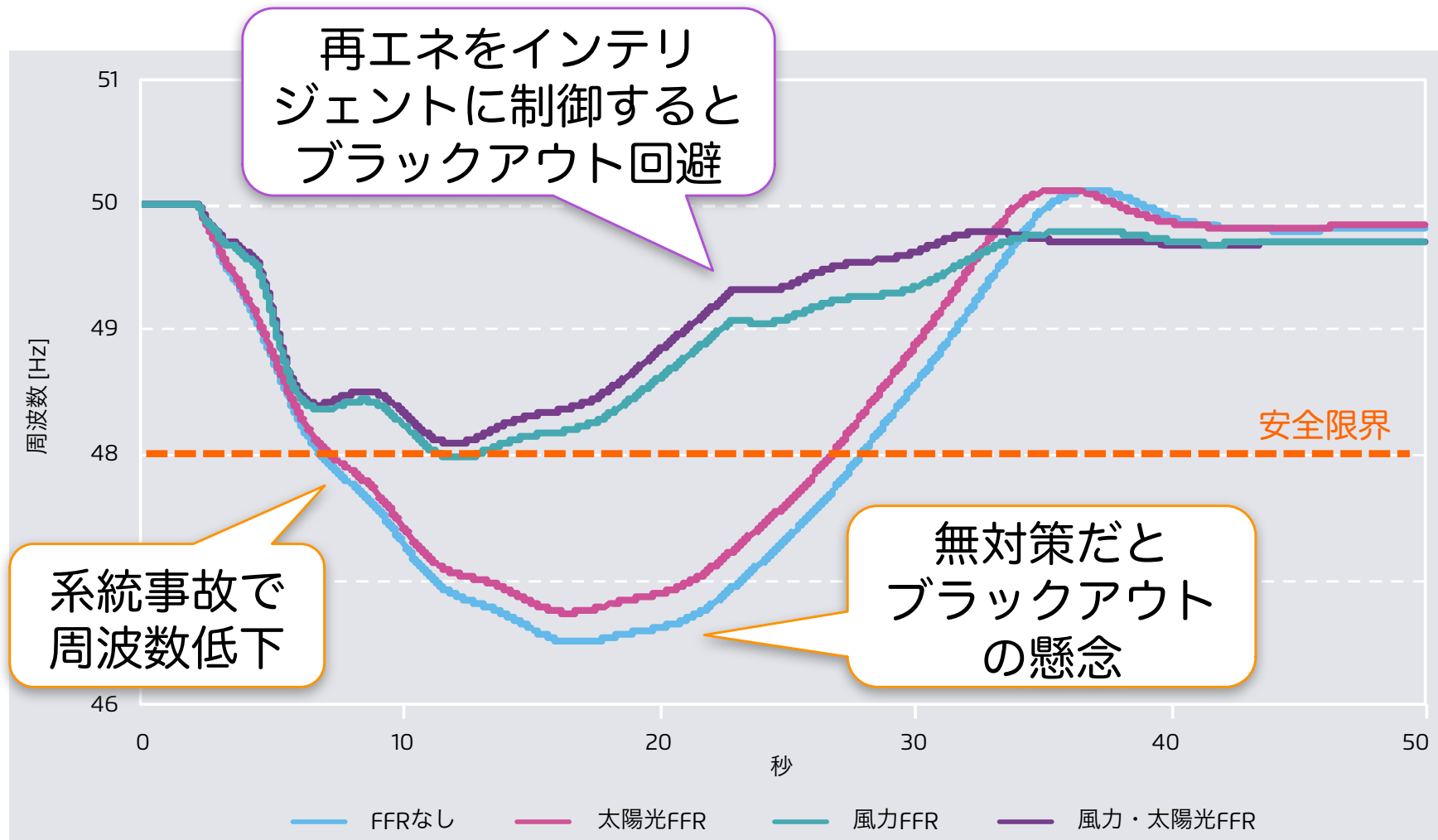


+ アイランドの非同期電源率 SNSP (System Non-Synchronous Penetration Ratio)



≡ 瞬間的な分散型
電源導入率

+ 疑似慣性シミュレーション結果





+ 慣性問題の解決方法

- 出力抑制
 - アイルランド: SNSP 50%以上 → 75%
- 擬似慣性
- 周波数変化 (RoCoF) リレーの緩和
- 同期調相機
- 新技術：
 - デジタルグリッド
 - 電力パケット etc...



+ 再エネ超大量導入は可能か？ (再エネは電力系統に悪影響を与えるか？)

- 単純な「Yes/No」に陥らないこと。
 - 賛成/反対の極端な二元論的対立(神学論争)になりやすい。
 - 再エネ賛成派は、課題を過小評価しないこと。
 - 再エネ慎重派は、将来の課題を理由に思考停止しないこと。
- 「どの程度？」
 - 程度問題。解決策は？ 代替案は？ 実現可能性は？
- 「いつまでに？」
 - 時間軸の問題。技術開発ロードマップ、優先順位
- 課題：
 - ① 需給調整 ■ ② 電圧上昇問題 ■ ③ 慣性問題